

核燃料輸送物設計変更承認申請書

熊原第 23-018 号
令和 5 年 06 月 20 日

原子力規制委員会 殿

住所 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央四丁目 33 番 5 号
氏名 原子燃料工業株式会社
代表取締役社長 伊藤 義章

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(平成 2 年科学技術庁告示第 5 号)第 41 条第 1 項の規定により、下記のとおり申請します。

記

1. 核燃料輸送物の名称

NFI-V 型

2. 核燃料輸送物設計承認番号

J/134/AF-96 (Rev.2)

3. 変更内容

- ・平成 25 年 11 月 1 日付原管廃発 1310302 号(平成 26 年 1 月 24 日付原管廃発 1401228 号をもって記載事項変更、平成 30 年 5 月 15 日付原規規発第 1805159 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(以下「既承認申請書」という。)の記載事項について別記の通り変更する。
- ・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」に吊り上げ及び内圧による疲労評価やショックマウントの経年変化の評価を追加する。
 - ・ (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輸送物の取扱い方法」を(ハ)章に、「安全設計及び安全輸送に関する特記事項」を(ニ)章に変更する。
- ・「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」から記載内容を一部修正しているが、品質管理の方針自体に変更はない。
- ・その他記載の見直しを行う。

4. 変更理由

- ・外運搬規則及び外運搬告示が改正されたため。
- ・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
- 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

以上

1.核燃料輸送物の名称

NFI-V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：約 cm
幅：約 cm
高さ：約 cm

(2)輸送容器の重量

kg 以下

(3)核燃料輸送物の総重量

kg 以下

(4)輸送容器の主要材料

表1の通り

(5)輸送容器の概略を示す図

図1の通り

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6月20日付熊原第23-018号）に係る別紙1の図(イ)－1から図(イ)－15までに示されている。

3.核燃料輸送物の種類

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2の通り

5.輸送制限個数

(1)輸送制限個数：
(2)配列方法：
(3)臨界安全指数：

6.運搬中に予想される周囲の温度の範囲

-40℃から38℃まで

7. 収納物の臨界防止のための核燃料輸送物の構造に関する事項

収納物の臨界防止のため、特別の試験条件においた場合においても局所的な損傷に抑え、収納物を所定の位置にとどめることができる堅牢な構造としている。

8. 臨界安全評価における浸水の領域に関する事項

臨界安全評価において、密封境界である燃料棒以外の輸送物に水が浸入するものとして評価している。

9. 収納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. BM 型輸送物にあつては、BU 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、本核燃料輸送物設計変更承認申請書（令和 5 年 6 月 20 日付熊原第 23-018 号）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、本核燃料輸送物設計変更承認申請書（令和 5 年 6 月 20 日付熊原第 23-018 号）に係る別紙のとおり。

13. その他特記事項

(1) 使用予定年数

80 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
- 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

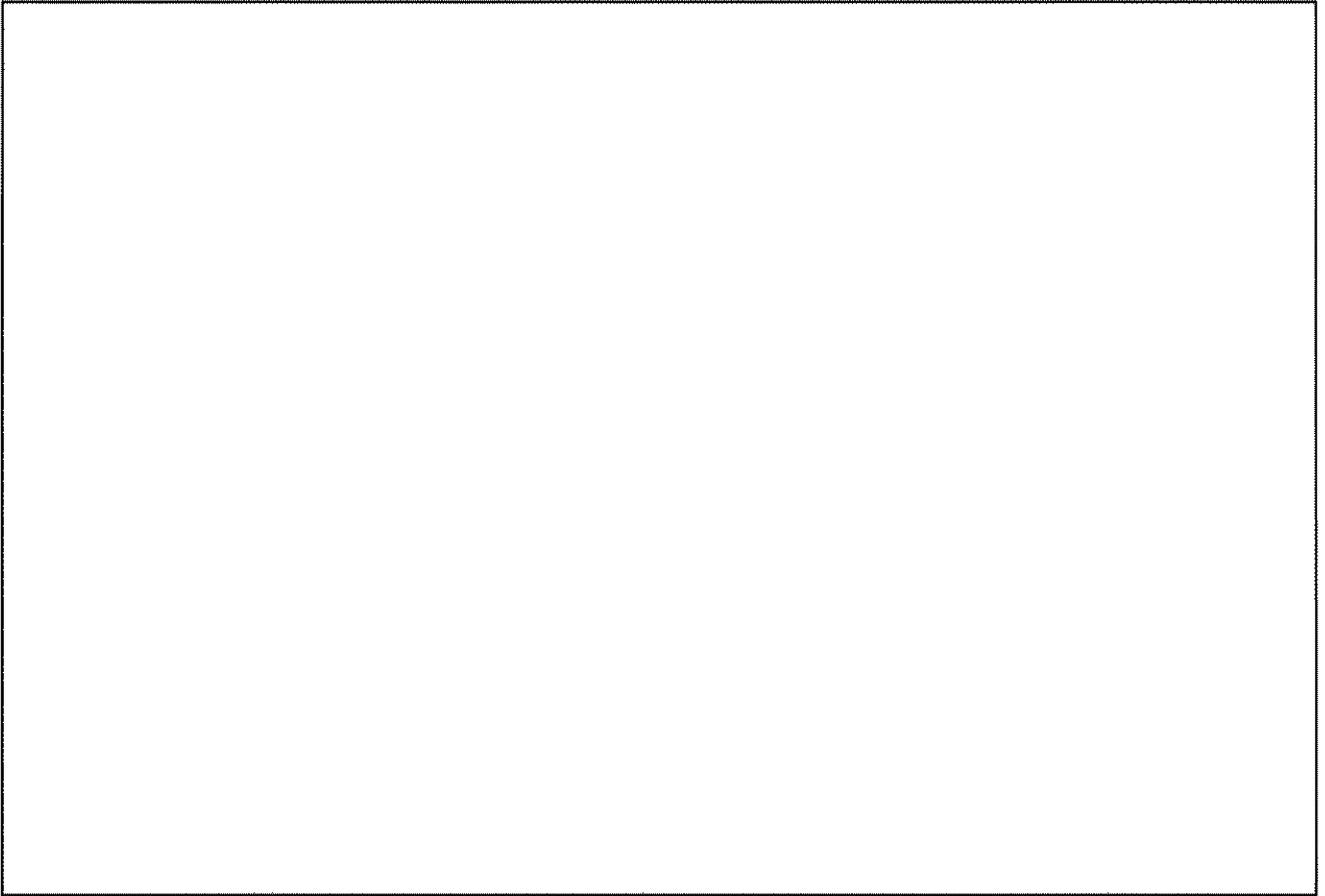


图 1 NFI-V 型输送物外观图

表 1 輸送容器の主要材料

容 器 部 位	材 質
上側ケース、下側ケース	ステンレス鋼 (SUS304)
ストロングバック、ショックマウントフレーム	ステンレス鋼 (SUS304)
断熱材	セラミックファイバー
ショックマウント	合成ゴム (ブチルゴム)
ガスケット	合成ゴム (シリコンゴム)
スキッド	合成ゴム (ウレタンゴム)
ボルト・ナット類	ステンレス鋼 (SUS304, SUS310S) 及びクロムモリブデン鋼 (SCM435)

表2 収納する核燃料物質等の種類、性状、重量及び放射能の量

型式	新燃料集合体				新燃料棒 組立体 (10×10型)	
	14×14型	15×15型	17×17型			
(輸送容器1基当たり)						
種類	軽水炉(PWR)用新燃料集合体又は新燃料棒組立体					
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			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	5.0wt%以下					
燃焼度	該当しない					
発熱量	該当しない					
冷却日数	該当しない					
(燃料集合体1体当たり)						
重量	集合体重量	595kg以下	680kg以下	670kg以下	695kg以下	400kg以下
	UO ₂ 量	465kg以下	530kg以下	515kg以下	545kg以下	260kg以下
濃縮ウラン 中の不純物 仕様	²³² U	≤0.0001 μg/gU				
	²³⁴ U	≤10×10 ³ μg/g ²³⁵ U				
	²³⁶ U	≤250 μg/gU				
	⁹⁹ Tc	≤0.01 μg/gU				
ただし、 ²³⁶ U<125 μg/gUの場合は、 ²³² U及び ⁹⁹ Tcは適用外						

以上

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

NFI-V 型

輸送物安全解析書

令和 5 年 6 月

原子燃料工業株式会社

目 次

(イ)章 核燃料輸送物の説明	(イ)-1
(イ)-A 目的及び条件	(イ)-1
(イ)-B 輸送物の種類	(イ)-1
(イ)-C 輸送容器	(イ)-1
(イ)-D 輸送容器の収納物	(イ)-18
(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析	(ロ)A-1
(ロ)-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-1
A.2 重量及び重心	(ロ)A-7
A.3 材料の機械的性質	(ロ)A-9
A.4 輸送物の要件	(ロ)A-13
A.4.1 化学的及び電氣的反応	(ロ)A-13
A.4.2 低温強度	(ロ)A-13
A.4.3 密閉装置	(ロ)A-13
A.4.4 吊上装置	(ロ)A-13
A.4.5 固縛装置	(ロ)A-26
A.4.6 圧 力	(ロ)A-26
A.4.7 振 動	(ロ)A-28
A.5 一般の試験条件	(ロ)A-30
A.5.1 熱的試験	(ロ)A-30
A.5.1.1 温度及び圧力の要約	(ロ)A-30
A.5.1.2 熱 膨 張	(ロ)A-30
A.5.1.3 応力計算	(ロ)A-30
A.5.1.4 許容応力との比較	(ロ)A-36
A.5.1.5 繰り返し応力の評価	(ロ)A-37
A.5.2 水 噴 霧	(ロ)A-38
A.5.3 自由落下	(ロ)A-39
(a) 解析モデル	(ロ)A-39
(b) 原型試験	(ロ)A-50
(c) モデル試験	(ロ)A-50
A.5.4 積み重ね試験	(ロ)A-55
A.5.5 貫 通	(ロ)A-58
A.5.6 角又は縁落下	(ロ)A-58
A.5.7 結果の要約及びその評価	(ロ)A-58

A.6	特別の試験条件	(口)A-59
A.7	強化浸漬試験	(口)A-59
A.8	放射性収納物	(口)A-60
A.8.1	収納物の仕様	(口)A-60
A.8.2	一般の試験条件における放射性収納物の挙動	(口)A-61
A.8.3	特別の試験条件における放射性収納物の挙動	(口)A-61
A.9	核分裂性輸送物	(口)A-61
A.9.1	核分裂性輸送物に係る一般の試験条件	(口)A-61
A.9.2	核分裂性輸送物に係る特別の試験条件	(口)A-63
参考資料(口)-A.1 参考文献一覧		
参考資料(口)-A.2 NFI-V型輸送容器 予備試験結果報告		
参考資料(口)-A.3 NFI-V型輸送容器 1/2縮尺モデル落下試験結果報告		
参考資料(口)-A.4 使用部材の低温における性質		
参考資料(口)-A.5 燃料棒被覆管の応力基準値		
参考資料(口)-A.6 ショックマウントの経年変化における安全評価への影響確認		
参考資料(口)-A.7 固有振動数導出に係る補足説明資料		

(口)-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-1
B.3	構成要素の仕様	(口)B-1
B.4	一般の試験条件	(口)B-3
B.4.1	熱解析モデル	(口)B-3
B.4.1.1	解析モデル	(口)B-3
B.4.1.2	試験モデル	(口)B-3
B.4.2	最高温度	(口)B-4
B.4.3	最低温度	(口)B-6
B.4.4	最大内圧	(口)B-7
B.4.5	最大熱応力	(口)B-7
B.4.6	結果の要約及びその評価	(口)B-8
B.5	特別の試験条件	(口)B-9
B.5.1	熱解析モデル	(口)B-9
B.5.1.1	解析モデル	(口)B-9
B.5.1.2	試験モデル	(口)B-9
B.5.2	輸送物の評価条件	(口)B-10
B.5.3	輸送物温度	(口)B-11
B.5.4	最大内圧	(口)B-18
B.5.5	最大熱応力	(口)B-21
B.5.6	結果の要約及びその評価	(口)B-22

参考資料(ロ)－B.1 参考文献一覧表

参考資料(ロ)－B.2 NFI-V型輸送容器 耐火試験結果報告書

(ロ)-C 密封解析	(ロ)C-1
C.1 概 要	(ロ)C-1
C.2 密封装置	(ロ)C-1
C.2.1 密封装置	(ロ)C-1
C.2.2 密封装置の貫通部	(ロ)C-1
C.2.3 密封装置のガスケット及び溶接部	(ロ)C-1
C.2.4 蓋	(ロ)C-2
C.3 一般の試験条件	(ロ)C-2
C.3.1 放射性物質の漏えい	(ロ)C-2
C.3.2 密封装置の加圧	(ロ)C-2
C.3.3 冷却材汚染	(ロ)C-3
C.3.4 冷却材損失	(ロ)C-3
C.4 特別の試験条件	(ロ)C-3
C.4.1 核分裂生成ガス	(ロ)C-3
C.4.2 放射性物質の漏えい	(ロ)C-3
C.5 結果の要約及びその評価	(ロ)C-4
(ロ)-D 遮蔽解析	(ロ)D-1
D.1 概 要	(ロ)D-1
D.2 線源仕様	(ロ)D-2
D.2.1 ガンマ線源	(ロ)D-2
D.2.2 中性子源	(ロ)D-2
D.3 モデル仕様	(ロ)D-4
D.3.1 解析モデル	(ロ)D-4
D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度	(ロ)D-7
D.4 遮蔽評価	(ロ)D-8
D.5 結果の要約及びその結果	(ロ)D-8
参考資料(ロ)－D.1 ORIGEN 2 コードの概要	
参考資料(ロ)－D.2 QAD-CGGP2R コードの概要	
参考資料(ロ)－D.3 最大線量当量率を与える評価点の検討	

(ロ)-E 臨界解析	(ロ)E-1
E.1 概 要	(ロ)E-1
E.2 解析対象	(ロ)E-2
E.2.1 収 納 物	(ロ)E-2
E.2.2 輸送容器	(ロ)E-3
E.2.3 中性子吸収材	(ロ)E-3
E.3 モデル仕様	(ロ)E-4
E.3.1 解析モデル	(ロ)E-4
E.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度	(ロ)E-8
E.4 未臨界評価	(ロ)E-9
E.4.1 計算条件	(ロ)E-9
E.4.2 輸送物への水の浸入等	(ロ)E-9
E.4.3 計算方法	(ロ)E-9
E.4.4 計算結果	(ロ)E-10
E.5 ベンチマーク試験	(ロ)E-12
E.6 結果の要約及びその評価	(ロ)E-13

(ロ)-F	規則及び告示に対する適合性の評価	(ロ)F-1
F.1	考慮すべき経年変化要因	(ロ)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	(ロ)F-2
F.3	安全解析における経年変化の考慮内容	(ロ)F-9
(ロ)-G	規則及び告示に対する適合性の評価	(ロ)G-1
(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-1
(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-9
A.3	取出し方法	(ハ)A-10
A.4	空容器の準備	(ハ)A-16
(ハ)-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-1
B.10	密封装置の弁、ガスケット等の保守	(ハ)B-1
B.11	輸送容器の保管	(ハ)B-1
B.12	記録の保管	(ハ)B-1
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 輸送容器の製作の方法の概要に関する説明

(イ)章 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

加圧水型軽水炉（PWR）用燃料集合体又は燃料棒の国内輸送及び国際輸送に使用することを目的とする。

(2) 輸送容器の名称 NFI-V 型

(3) 輸送物の種類 A 型核分裂性輸送物

(4) 輸送物の制限個数

(5) 輸送制限配列

(6) 輸送指数

(7) 臨界安全指数

(イ)-B 輸送物の種類

A 型核分裂性輸送物

(イ)-C 輸送容器

(1) 総重量

輸送容器の重量

輸送物の総重量

(2) 構成材料

主要構成材料は次のとおりである。

上側ケース、下側ケース	ステンレス鋼（SUS304）
ストロングバック、ショックマウントフレーム	ステンレス鋼（SUS304）
断熱材	セラミックファイバー
ショックマウント	合成ゴム（ブチルゴム）
ガスケット	合成ゴム（シリコンゴム）
スキッド	合成ゴム（ウレタンゴム）
ボルト・ナット類	ステンレス鋼（SUS304, SUS310S）及び ビクロムモリブデン鋼（SCM435）

なおこれらの構造材料の構成部品との対応の詳細を表(イ)-1 に示す。また各々の部分には、番号を付けて図(イ)-1 及び図(イ)-2 に輸送容器構造との対応を示す。

(3) 中性子吸収材

中性子吸収材として、ボロン入りステンレス鋼板(厚み 、長さ 、幅) を使用している。輸送容器は、図(イ)-1 及び図(イ)-2 に示すように、4 枚の中性子吸収材を 2 体の収納物の間及び下部に配し、臨界を防止する構造となっている。

(4) 中性子減速材

該当なし

(5) 遮蔽材

該当なし

(6) 主要部分の寸法及び構造

輸送容器の主要部分の寸法及び構造を 図(イ)-1 から図(イ)-9 に示す。寸法については表(イ)-1 にも示す。

(a) 概 要

輸送容器は、上側ケース、下側ケース及び内部構造物から構成されている。内部構造物は、収納物を保持するストロングバック、ストロングバックを支えるショックマウントフレーム及びショックマウントフレームを弾性的に支持するショックマウントから構成されており下側ケース内部にショックマウントを介して支持されている。上側ケースと下側ケースはロッドボルトで締め付ける構造である。

収納物はストロングバック上に中性子吸収材を中間及び下部に介し、2 体が平行に配置して収納される。

なお、収納する収納物の種類により、クランプ等の支持構造物を配置替えして使用する。

写真(イ)-1 に輸送容器の外観を、写真(イ)-2 にストロングバックを立てた状態をそれぞれ示す。

(b) 構 造

①上側ケース (図(イ)-1 及び図(イ)-2 参照)

上側ケースは外筒側面に厚さ 、端面に厚さ のステンレス板を使用し、内筒には厚さ のステンレス鋼板を使用している。外筒と内筒間の中空部分にはリブを入れて補強するとともに、断熱材としてセラミックファイバーを充填している。

上側ケース上部にはクレーンにより移動する際に用いるスタッキングブラケット (図(イ)-3) を溶接により取付けている。また、外筒には 14 個の可融栓を取付けている。

上側ケース両端部にはステンレス鋼製パイプを層状に構成した緩衝体を内部に取付けている。

②下側ケース（図(イ)-1及び図(イ)-2参照）

下側ケースは、上側ケースとほぼ同一構造で、外筒側面に厚さ 、端面に厚さ のステンレス鋼板を使用し、内筒には厚さ のステンレス鋼板を使用している。外筒と内筒間の中空部分にはリブを入れて補強するとともに、断熱材としてセラミックファイバーを充填している。

下側ケース底部の両端には合成ゴム製のスキッドが、中央にはリフトガイドを取付けている。

上部ノズル側端面には断熱機能を備えたバルブカバーが取付けてあり、内部のレリーフバルブ、エアーバルブを保護している。

レリーフバルブ（図(イ)-4）は、容器の内外圧力差が一定値（）を超えたとき、作動するものである。

エアーバルブ（図(イ)-5）は2個あり、1個は容器に内部を加圧するとした場合に用い、もう1個は内部圧力測定に用いる。

③ストロングバック（図(イ)-1、図(イ)-2及び図(イ)-6参照）

ストロングバックはT溝バー及び角型鋼材を溶接して製作したスケルトンにボロン入りステンレス鋼板をねじで固定し、収納物固縛用の弓型クランプを取付けたものである。その両端には収納物の前後方向の移動防止のため上部ゲート及び下部ゲートを取付けている。

弓型クランプはT溝バーにT溝ボルトを介して固定されているため、このボルトを緩めることで、燃料集合体の支持格子位置に合わせて移動することができる。

ストロングバックの下部ゲート側の下部にはシャフトが取付けられており、ショックマウントフレームに取付けられた軸受を中心に垂直に起立させることができる。

ストロングバックとショックマウントフレームは10個のボルトにより固定されている。

④ショックマウント（図(イ)-7参照）

ショックマウントは、図(イ)-7にその形状を示すように、ブチルゴムが主材質の防振ゴムである。ショックマウントの片端を下側ケースに、他端をショックマウントフレームに固定する。すなわち、18個のショックマウントはショックマウントフレームを懸架するのに用いられる。

⑤ショックマウントフレーム（図(イ)-8参照）

ショックマウントフレームは、図(イ)-8にその構造を示すように、チャンネルを角型に組み溶接の上製作したものである。このショックマウントフレームは、収納物の収納用ストロングバックを保持するために、ショックマウントで下側ケースに懸架される。また、ストロングバックを垂直に立てたとき、過度の集中荷重が特定のショックマウントに集中する

のを防ぎ、収納物の荷重の大部分を下側ケースにかけるため、2個のトグルクランプが設けられている。また、ショックマウントフレームには輸送中、過度の振動を受けて変位したとき、これを検出するための銅製の変位計を取付けている。

⑥中性子吸収材

(イ)-C (3)参照

⑦ロッドボルト (図(イ)-9 参照)

ロッドボルトは、図(イ)-9 にその構造を示すように、クロムモリブデン鋼の棒材を機械加工して M16 のボルトに仕上げたものである。外側ケースは、そのフランジをガスケットを介してロッドボルトで締めることにより密閉する構造である。

⑧ガスケット (図(イ)-2 参照)

ガスケットは、シリコンゴムを鋳込み成型したものであり、前述の上側ケースと下側ケースを固定するとき、密閉性を得るために用いる。

⑨ポリエチレン袋

燃料集合体を装荷する場合は、その外表面を保護するためポリエチレン袋を用いる。

⑩その他補助的機構

本輸送容器は上述した機構の外に、次の機構を備えている。

輸送物の安全性とは別に製品管理の目的でショックマウントフレームの長手方向両端に、加速度計を取付け、輸送容器の取扱い及び輸送中の収納物への異常な衝撃の有無を監視する。

(7) 試料採取口

該当なし

(8) 熱除去の方法

該当なし

(9) 冷却材の種類及び量

該当なし

(10) 弁及び試料採取口等の開口部及び配管

該当なし

(11) 内部及び外部の突出物

輸送容器の内部には、顕著な突出物はない。外部ではフォークリフト等で持ち上げるためのリフトガイド、クレーン用の吊り上げ孔を有するスタッキングブラケット及び輸送容器本体の緩衝材となるスキッドが主な突出物である。

(12) 吊上装置

輸送容器の吊上装置として、上側ケース上の 4 ケ所の位置にスタッキングブラケットが取付けられている。このスタッキングブラケットの各々に設けられた吊り上げ孔により輸送容器を吊り上げる。(図(イ)-1 及び図(イ)-8 参照)

(13) 固縛装置

本輸送容器には固縛装置は設けられていない。運搬する際には車輛や運搬用コンテナにワイヤーや専用の固縛部材等を用いて固縛される。

(14) 圧力逃がし弁 (図(イ)-4 参照)

輸送物の密封境界としては、燃料棒が該当し、燃料棒には圧力逃がし弁に相当するものはない。ただし、輸送容器は密閉構造となっていることから、圧力調節のためのレリーフバルブを取付けている。図(イ)-4 にレリーフバルブを示す。2 ウエイ方式の本バルブは内外圧差が設定圧力以上になると開放して輸送容器の内部圧力を調節する。

(15) ガasket

ガスケットは、シリコンゴムを鋳込み成型したものであり、前述の上側ケースと下側ケースを固定するとき、密閉性を得るために用いる。

(16) 密封境界

本輸送容器の密封境界は燃料被覆管が該当する。ジルカロイ-4 製又はジルコニウム合金製被覆管の両端にジルカロイ-4 製端栓を接合し溶接密封することで、密封境界を形成する。

(17) 浸水の領域

臨界解析において、一般の試験条件下及び特別の試験条件下において密封境界である燃料棒周囲まで水が侵入するものとして評価している。

(18) 密封装置

輸送物の密封境界としては、燃料棒が該当し、本輸送容器には該当する装置はない。ただし、輸送容器は上側ケース及び下側ケースのフランジ面でガスケットを介してボルトにより締め付けることにより密閉構造としている。

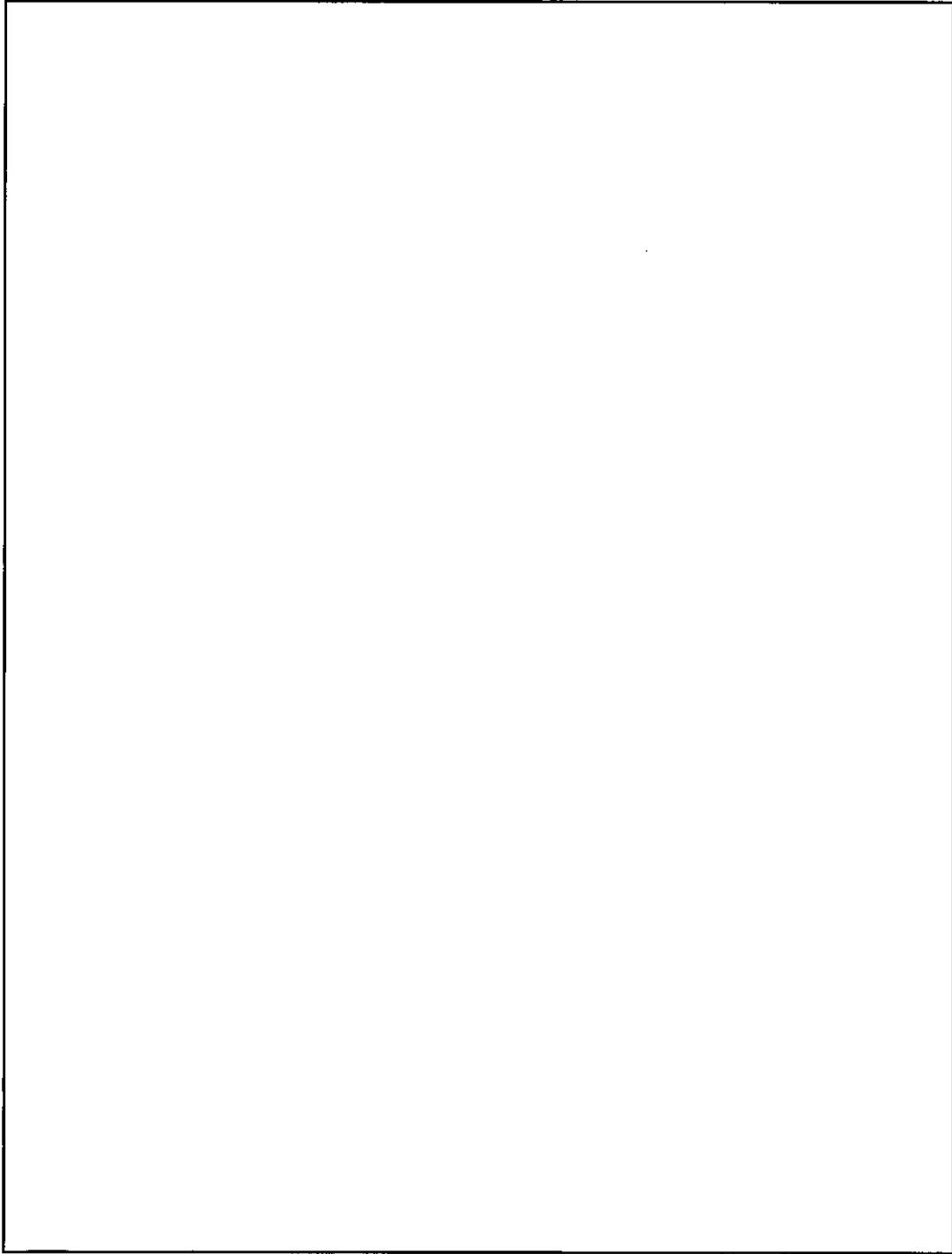
表(イ)-1 主要構造材料

(注) 番号は図(イ)-1又は図(イ)-2と対応する

番号	主要構成要素					主要部品					
	主要構成要素名	主要材質	構造(重量)	寸法(mm)	個数	参照図面	主要部品名	主要材質	個数	参照図面	
1	上側ケース	SUS304	溶接 <input type="text"/>	<input type="text"/>	1	図(イ)-1	スクロップブリケット 断熱材	SUS304 セラミック	4 1	図(イ)-3 図(イ)-2	
2	下側ケース	SUS304	溶接 <input type="text"/>		1	図(イ)-1	リフトガイド スキャ エアバルブ レリーフバルブ 断熱材	SUS304 ウレタンゴム SUS304 SUS304 セラミック	2 4 2 1 1	図(イ)-1 図(イ)-1 図(イ)-5 図(イ)-4 図(イ)-2	
3	ストロングバック	SUS304	溶接及びボルト締め <input type="text"/>		1	図(イ)-6	上部ゲート 下部ゲート Uサポ 弓型クランプ	SUS304 SUS304 SUS304 SUS304	1 1 28~36 14~18	図(イ)-6 図(イ)-6 図(イ)-2 図(イ)-2	
4	ショックマウント	ブチルゴム	鋳込成型 <input type="text"/>		18	図(イ)-7					
5	ショックマウント フレーム	SUS304	溶接 <input type="text"/>		1	図(イ)-8	トグルクランプ 変位計	SUS304 Cu	2 8	図(イ)-8 図(イ)-8	

表(イ)-1 主要構造材料 (つづき)

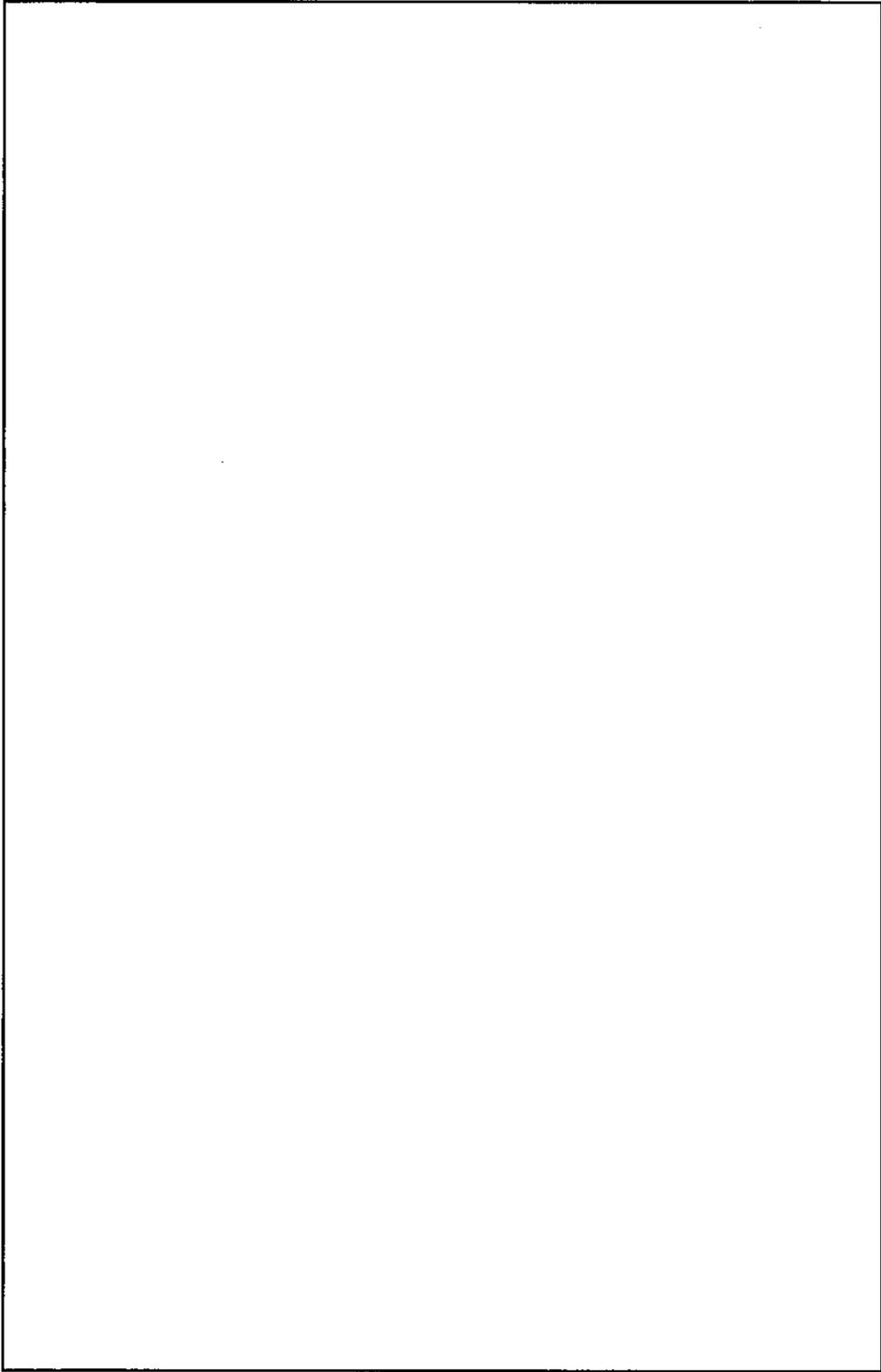
番号	主要構成要素				主要部品					
	主要構成要素名	主要材質	構造 (重量)	寸法 (mm)	個数	参照図面	主要部品名	主要材質	個数	参照図面
6	中性子吸収材	ボロン入り SUS304	圧延 <input type="text"/>	<input type="text"/>	4	図(イ)-2				
7	ロッドボルト	SCM435	機械加工		44	図(イ)-9				
8	ガスケット	シリコンゴム	鋳込成型 <input type="text"/>		1	図(イ)-2				
9	ポリエチレン袋	ポリエチレン	圧延 <input type="text"/>		2	図(イ)-2				



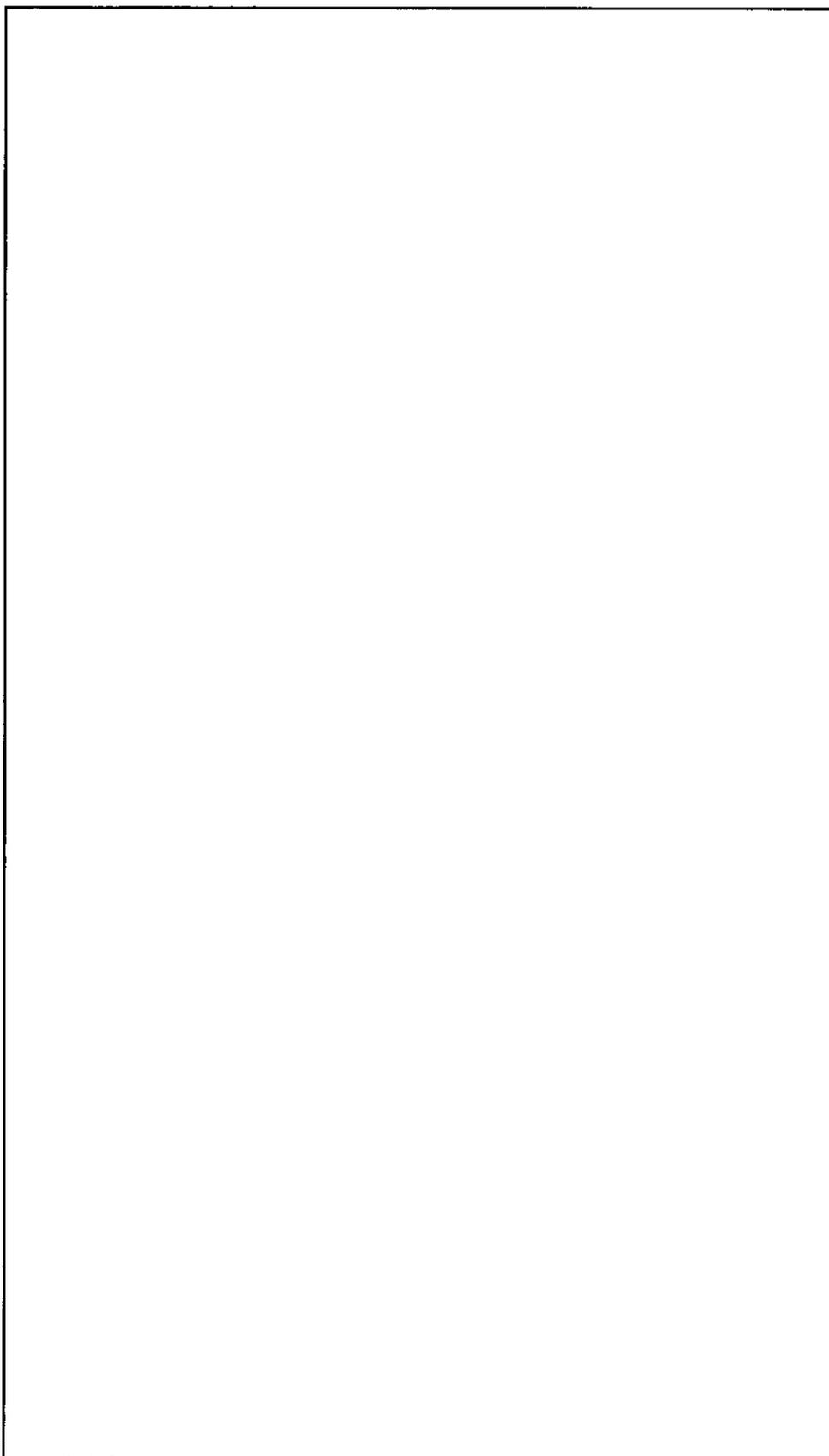
图(イ)-1 輸送容器構造図



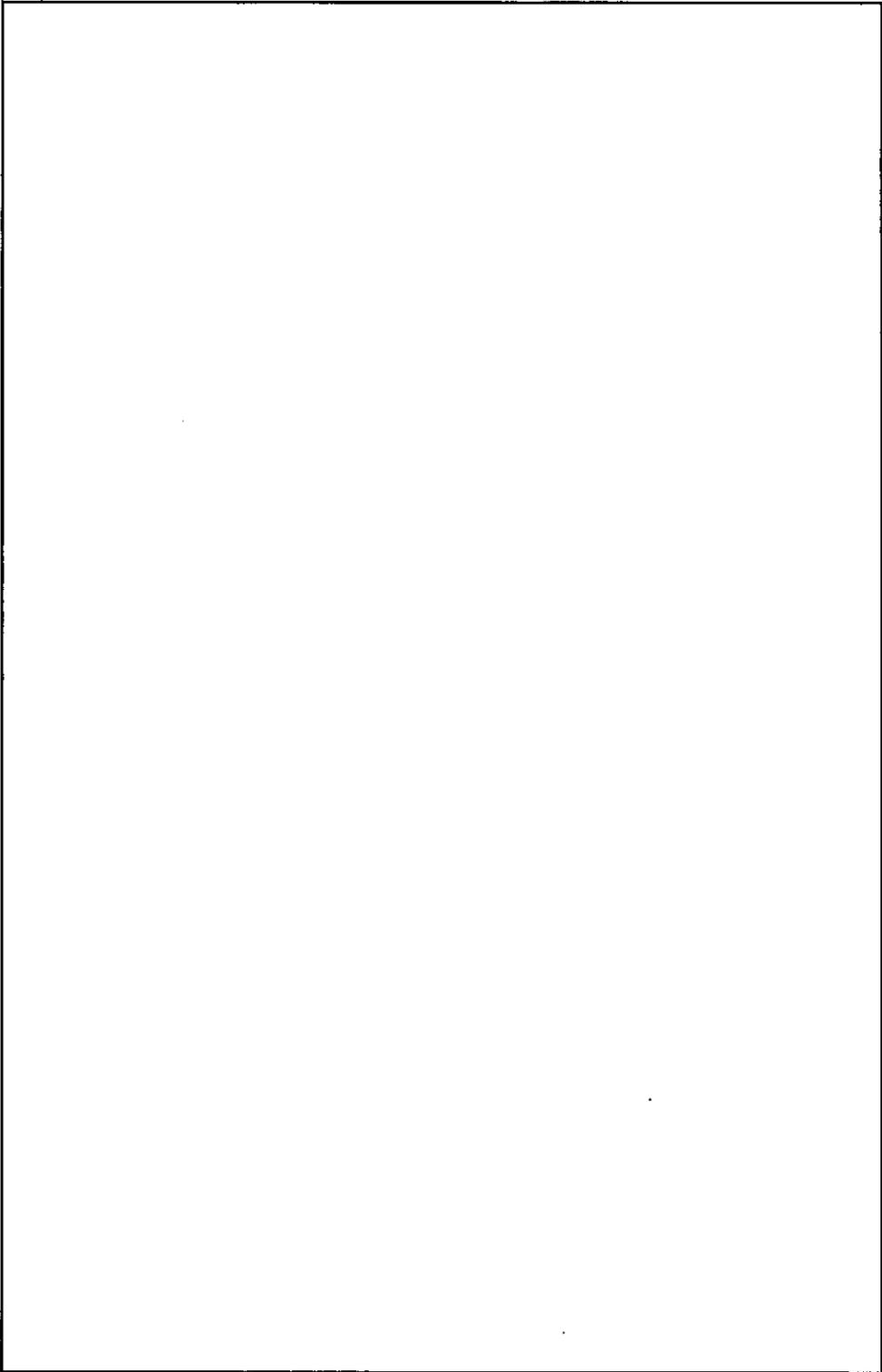
图(イ)-2 燃料輸送容器断面図



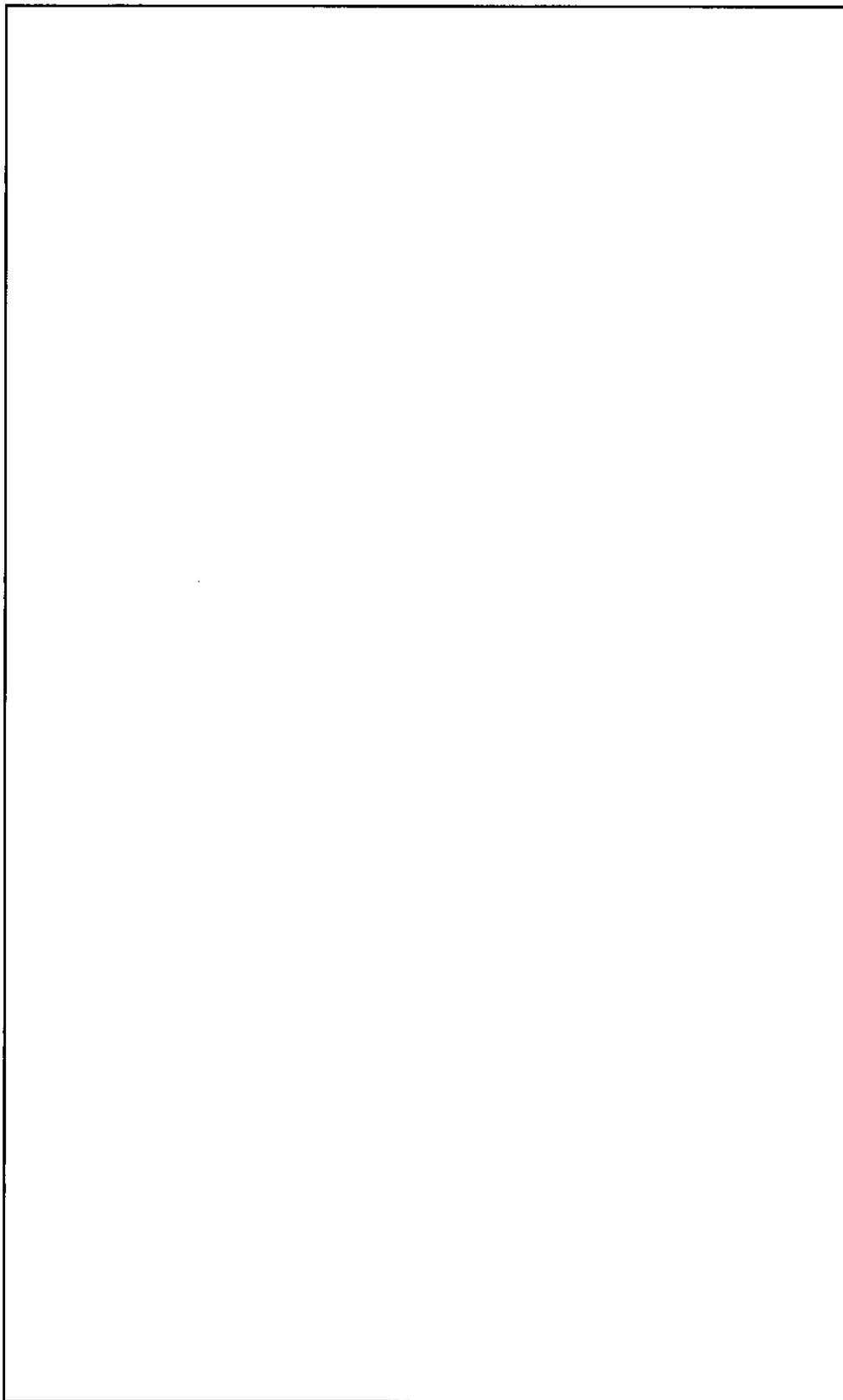
図(イ)-8 スタッキンググラケット



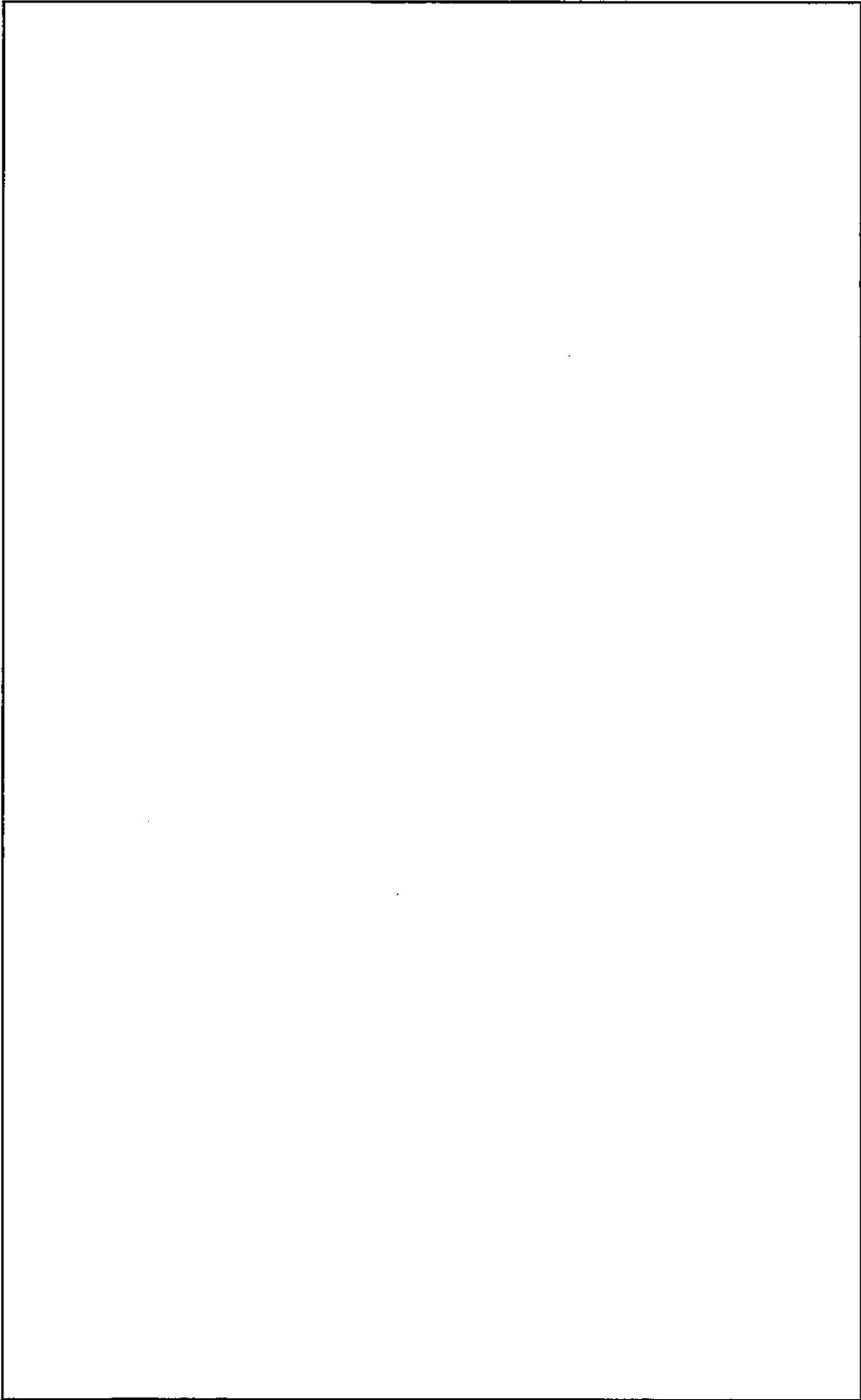
図(イ)-4 レリーフバルブ



図(イ)-5 エアーバルブ



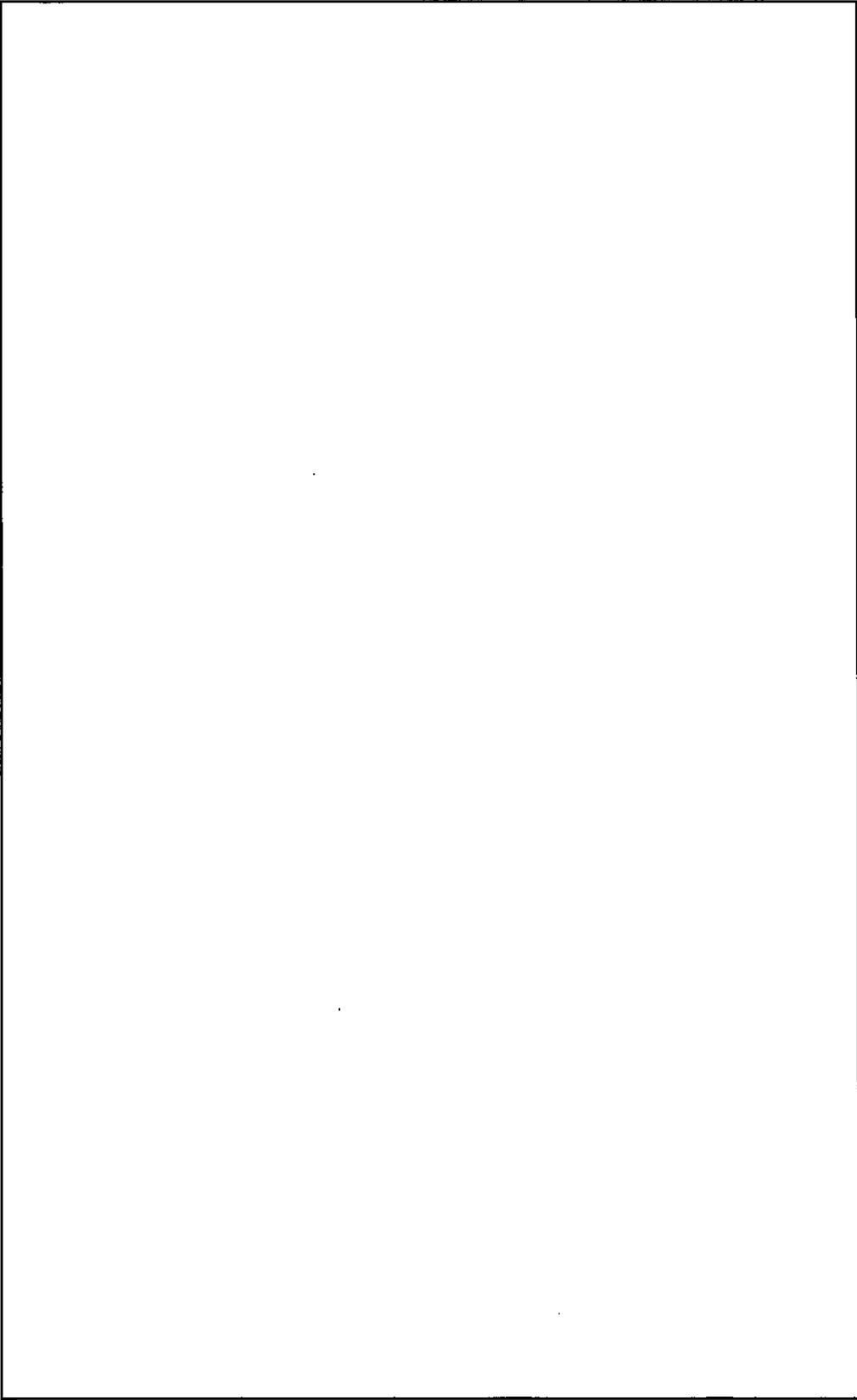
図(イ)-6 ストロングバック



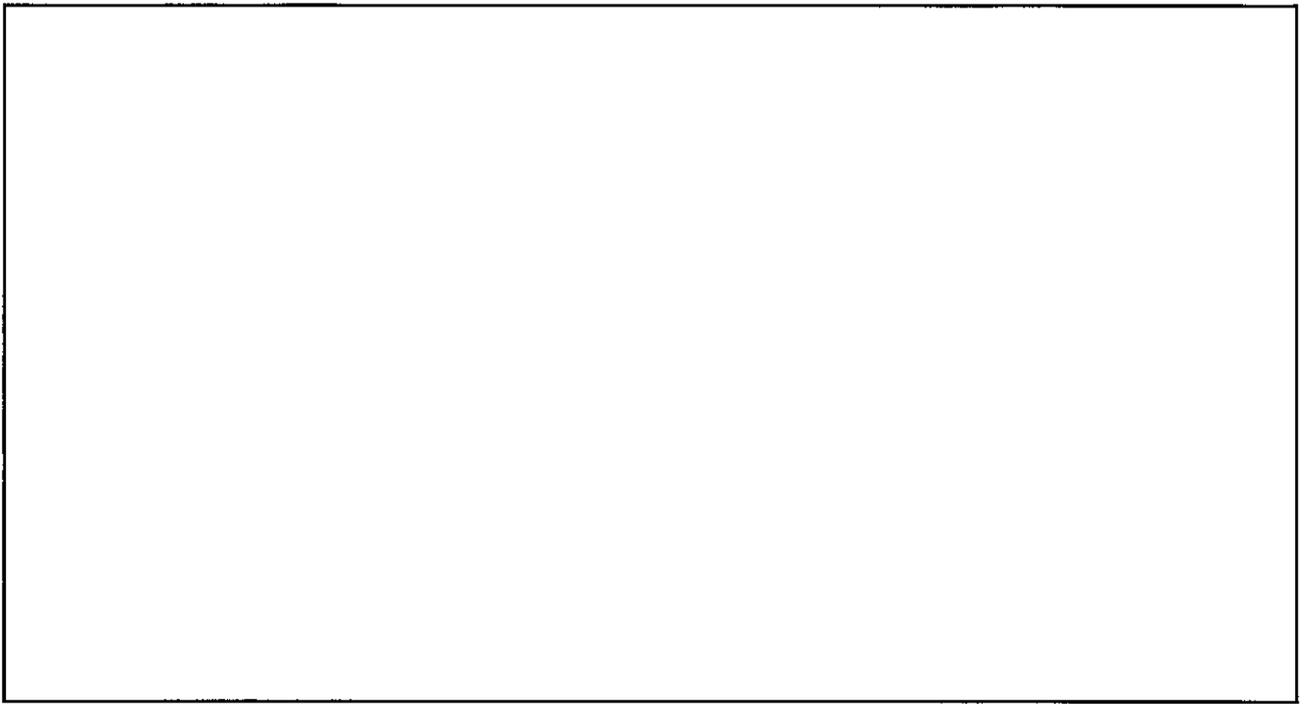
図(イ)-7 ショックマウント



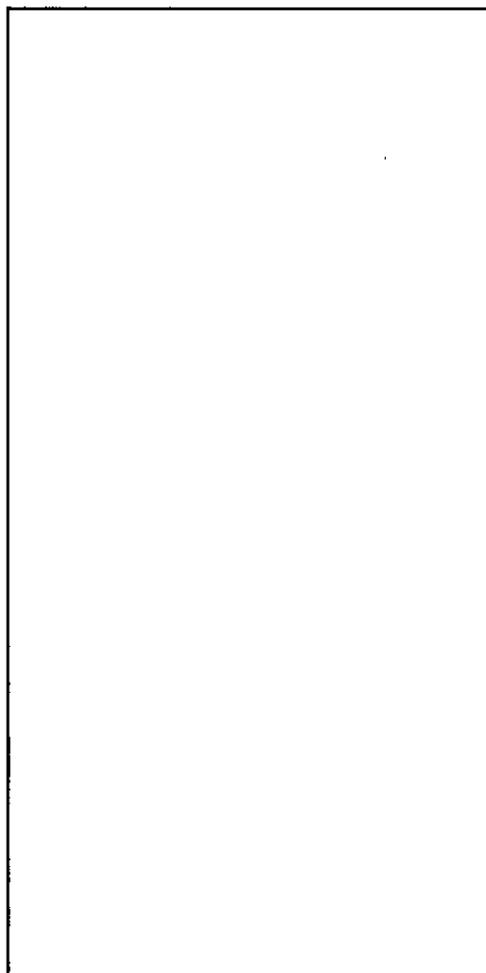
図(イ)-8 ショックマウントフレーム



図(イ)-9 ロッドボルト



写真(イ)-1 容器全景



写真(イ)-2 内部構造物 (立起こした状態)

(イ)・D 輸送容器の収納物

(1) 概要

本輸送容器に収納する核燃料物質は、最大 UO₂ (収納物 2 体分) の焼結研磨された未照射の二酸化ウラン焼結体 (UO₂ 焼結体) 又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体である。この核燃料物質の最大濃縮度は wt% であり、収納される状態としては、二酸化ウラン焼結体 (UO₂ 焼結体) 又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体をジルカロイ-4 製又はジルコニウム合金製被覆管に装入し、この両端を溶接して密封した燃料棒とし、この燃料棒を燃料集合体構成部材を用いて、14×14、15×15 又は、17×17 の正方格子配列の燃料集合体に組立てたもの並びにこの燃料棒を専用バスケットに収納した燃料棒組立体である。燃料集合体及び燃料棒組立体の形状を 図(イ)・10 から図(イ)・14 に示す。

(2) 主要な核種の放射性物質の量

(a) 主要な核種及び放射能の量 (収納物 2 体分)

	232U	234U	235U	236U	238U	99Tc	合計
放射能 (Bq)	<input type="text"/>						
	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下

(b) 重量 : UO₂ 以下 (収納物 2 体分)

(c) 濃縮度 : 以下

(3) 物理的形状

焼結研磨された二酸化ウラン焼結体 (UO₂ 焼結体) 又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体をジルカロイ-4 製又はジルコニウム合金製被覆管に装入し、両端を溶接して密封した燃料棒を、燃料集合体構成部材を用いて 14×14、15×15 又は、17×17 の正方格子配列に組立てた燃料集合体並びに専用バスケット内に 10×10 の正方格子配列で燃料棒を収納した燃料棒組立体が収納物となる。燃料集合体の構造は、図(イ)・10 から図(イ)・13 に示すように燃料棒、上下部ノズル、支持格子等から構成されている。燃料棒は、図(イ)・15 に示す構造で輸送物の密封境界としての性能を備え、支持格子は、燃料集合体の軸方向に 7 個、8 個又は 9 個配列され、燃料棒を弾性的に懸架している。

燃料棒組立体の構造は 図(イ)・14 に示すように、燃料棒、上下部ノズル、支持構造等から構成されている。支持構造は組立体の軸方向に 9 個配列され、燃料棒を弾性的に懸架している。

(3)-1 収納物の構成要素

燃料集合体及び燃料棒組立体の主要な構成要素の数量は、次表のとおりである。なお、燃料集合体の種類は、燃料棒 179 本の 14×14 (7 支持格子) 型、同 14×14 (8 支持格子) 型、204 本の 15×15 型、 264 本の 17×17 (9 支持格子) 型の 4 種類がある。

また、燃料棒組立体には 100 本の燃料棒を組み込むことができる。

形式	燃料集合体				燃料棒組立体
	14×14 型	15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57	
燃料棒	179 本	204 本	264 本	264 本	100 本
制御棒案内管	16 本	20 本	24 本	24 本	—
計測用案内管	1 本	1 本	1 本	1 本	—
支持格子 (支持構造)	7 個又は 8 個	7 個	9 個	9 個	9 個
上部ノズル	1 個	1 個	1 個	1 個	1 個
下部ノズル	1 個	1 個	1 個	1 個	1 個

(3)-2 収納物の重量

収納物の構成材料の最大重量は次表に示すとおりである。

項目	燃料集合体				燃料棒組立体
	14×14 型	15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57	
二酸化ウラン焼結体 又はガドリニア入り 二酸化ウラン焼結体					
燃料棒					
二酸化ウラン重量					
燃料集合体重量 燃料棒組立体重量					

(3)-3 収納物の構成材料

収納物の構成材料は次のとおりである。

① 燃料集合体

上・下部ノズル	ステンレス鋼板 (SUS304L) 等
支持格子	718 合金及びジルカロイ-4 板
制御棒案内管	ジルカロイ-4 管
計測用案内管	ジルカロイ-4 管
燃料棒	
焼結体	二酸化ウラン又はガドリニア入り二酸化ウラン
被覆管	ジルカロイ-4 管又は ジルコニウム合金 (Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金) 管
ペレット押えバネ	ステンレス鋼線 (SUS302) 等
端栓	ジルカロイ-4 棒

② 燃料棒組立体

上・下部ノズル	ステンレス鋼板 (SUS304L) 等
支持構造	ステンレス鋼板 (SUS304L) 及びポリエチレン
その他構造材	ステンレス鋼板 (SUS304L) 等
燃料棒	
焼結体	二酸化ウラン又はガドリニア入り二酸化ウラン
被覆管	ジルカロイ-4 管又は ジルコニウム合金 (Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金) 管
ペレット押えバネ	ステンレス鋼線 (SUS302) 等
端栓	ジルカロイ-4 棒

(3)-4 収納物の主要寸法

燃料棒の主要寸法は次のとおりである。

項目	14×14、15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57
二酸化ウラン焼結体			
直径	9.21 mm	8.05 mm	8.19 mm
高さ	約 10.0 mm	約 9.0 mm	約 9.2 mm
被覆管			
直径	10.72 mm	9.50 mm	9.50 mm
肉厚	0.66 mm	0.64 mm	0.57 mm
燃料棒			
有効長	3,642 mm	3,648 mm	3,648 mm
全長	3,866 mm (3,856 mm)	3,852 mm	3,862 mm (3,852 mm)

注 カッコ () 内は 48 GWd/t 用燃料集合体の寸法を示す。

(3)-5 耐熱性

収納物の構成材料のうち核燃料物質である二酸化ウランを密封する被覆管の耐熱性について説明する。

ジルカロイ-4の融点は、約 1,782 °Cである。ジルカロイ-4の機械的強度は温度とともに低下する。例えば常温での引張強さ及び耐力がそれぞれ MPa 及び MPa 以上のものが「B.5.4 最大内圧」で被覆管耐力基準値の設定温度としている 385 °Cにおいてはそれぞれ MPa 及び MPa 以上となる。

また、ジルコニウム合金の融点は、約 1,796 °Cである。ジルコニウム合金の機械的強度は温度とともに低下する。例えば常温での引張強さ及び耐力がそれぞれ MPa 及び MPa 以上のものが「B.5.4 最大内圧」で被覆管耐力基準値の設定温度としている 385 °Cにおいてはそれぞれ MPa 及び MPa 以上となる。

(4) 化学的性質

ウラン酸化物（焼結体）及びガドリニア入りウラン酸化物（焼結体）は、化学的に安定な性質を有しており、他の収納物と相互に化学反応を生じることはなく、耐食性上問題となることはない。また、接触しても電位差を生じることはないので電気化学反応は発生しない。

ジルカロイ-4、ジルコニウム合金、ステンレス鋼及び 718 合金は、化学的に安定な性質を有しており、相互に化学反応を生じることはなく、耐食性上問題となることはない。また、接触しても電位差を生じることはないので電気化学反応は発生しない。

また、ポリエチレンについても、化学的に安定な性質を有しており、輸送容器及び収納物と化学反応を生じることはなく、耐食性上問題となることはない。また、接触しても電位差を生じることはないので電気化学反応は発生しない。

(5) 材料密度

主要材料の密度は次のとおりである。

二酸化ウラン焼結体	$1.04 \times 10^4 \sim 1.07 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$
ジルカロイ-4	$6.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ジルコニウム合金	$6.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
718 合金	$8.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ステンレス鋼 (SUS304L)	$7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

(6) 収納物の密封性

焼結体は、二酸化ウラン粉末をプレス成型後焼結してセラミックとした固体で、粉末のように飛散することはない。燃料棒内に溶接により封じ込めることで密封性を担保している。

(7) 最大崩壊熱量

収納物であるウラン酸化物は未使用の新燃料であり、その崩壊熱量は無視し得る。

(8) 密封容器の最大圧力

本輸送容器は密封容器ではない。密封境界である燃料棒の最大圧力は常温で約 3.24×10^6 Pa である。これは燃料棒のヘリウム充填圧力である。

(9) 装荷制限

i)濃縮度

%wt 以下

ii)最大収納量

燃料集合体 2 体もしくは燃料棒組立体 2 体

※なお、収納物は異なる型のは混載しない。

iii)濃縮ウランの種類

濃縮ウラン（再生濃縮ウランを除く：ASTM C996-04 ECGU に準拠）

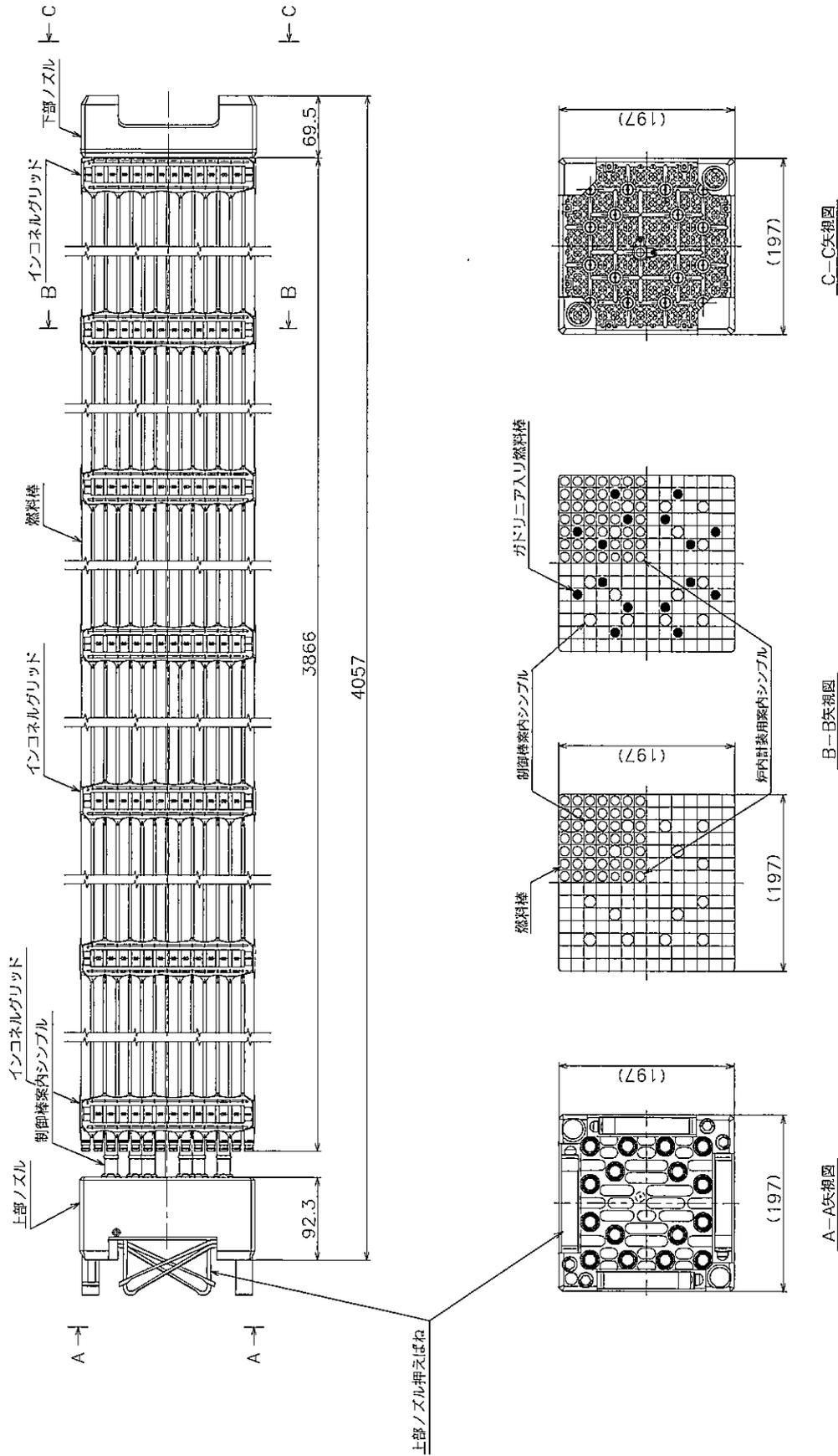
$$^{232}\text{U} \leq 0.0001 \mu\text{g/gU}$$

$$^{234}\text{U} \leq 10 \times 10^3 \mu\text{g/g}^{235}\text{U}$$

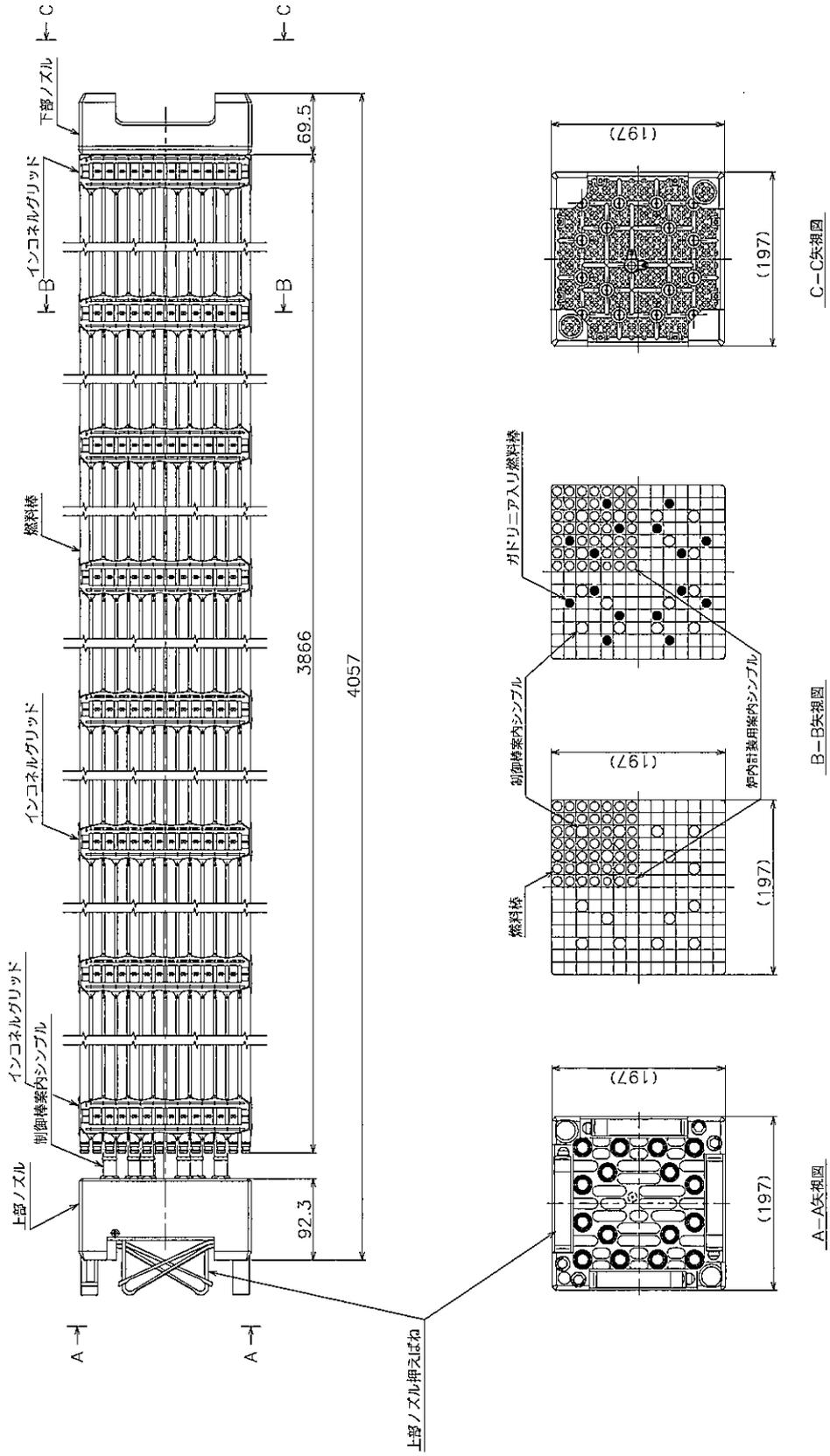
$$^{236}\text{U} \leq 250 \mu\text{g/gU}$$

$$^{99}\text{Tc} \leq 0.01 \mu\text{g/gU}$$

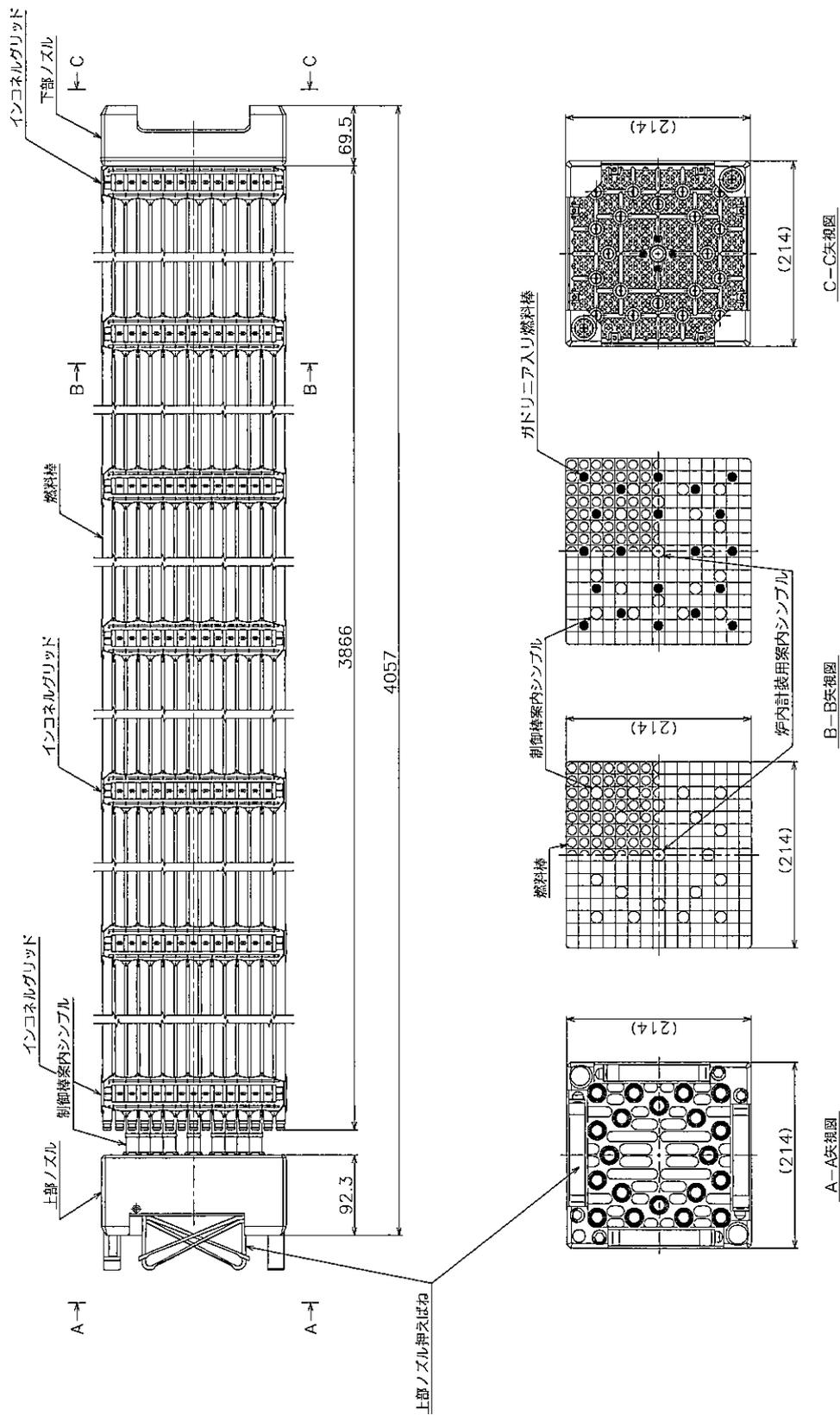
ただし、 $^{236}\text{U} < 125 \mu\text{g/gU}$ の場合は、 ^{232}U 及び ^{99}Tc は適用外



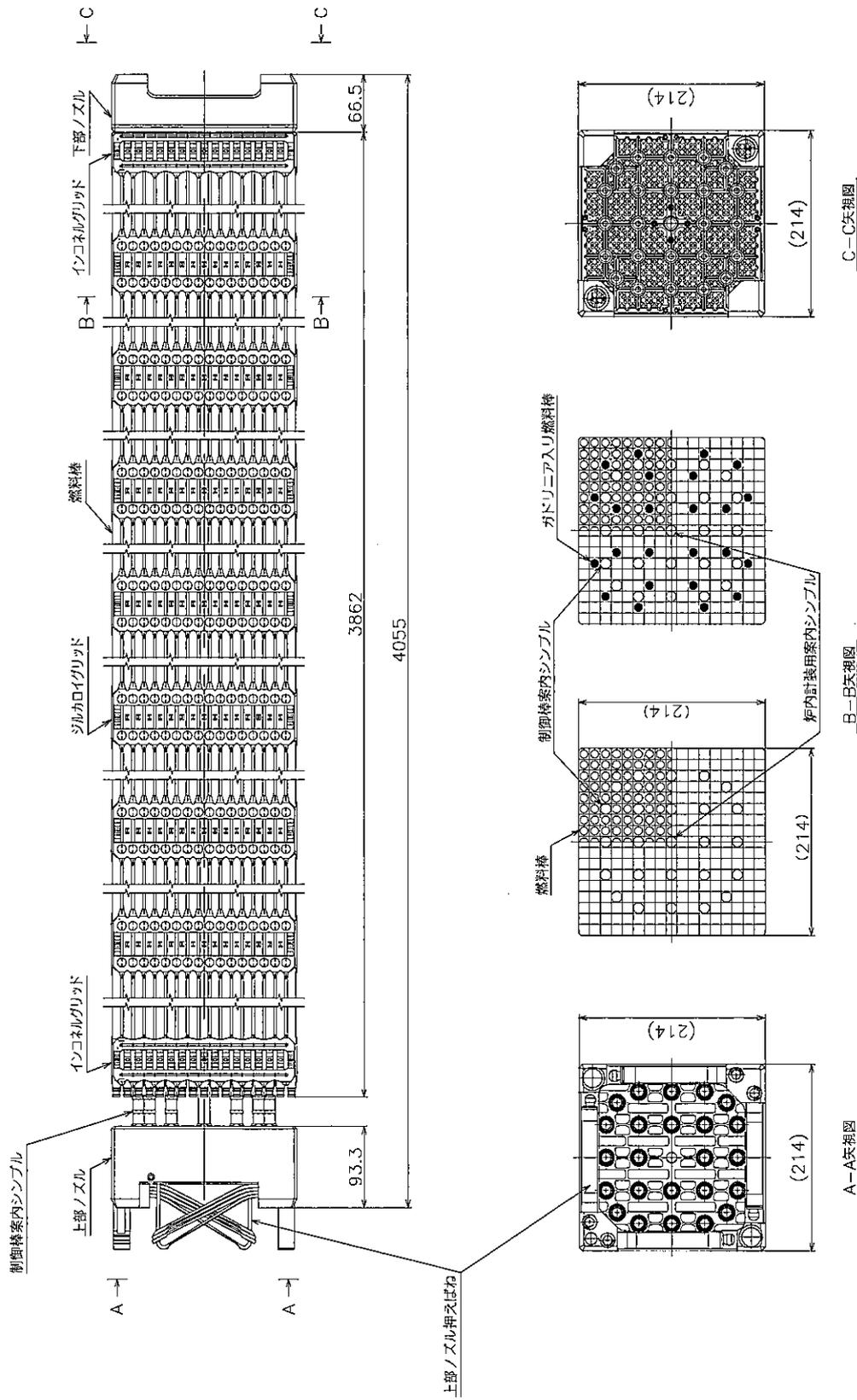
図(イ)-10 14×14-7 グリッド燃料集集体構造図(例)



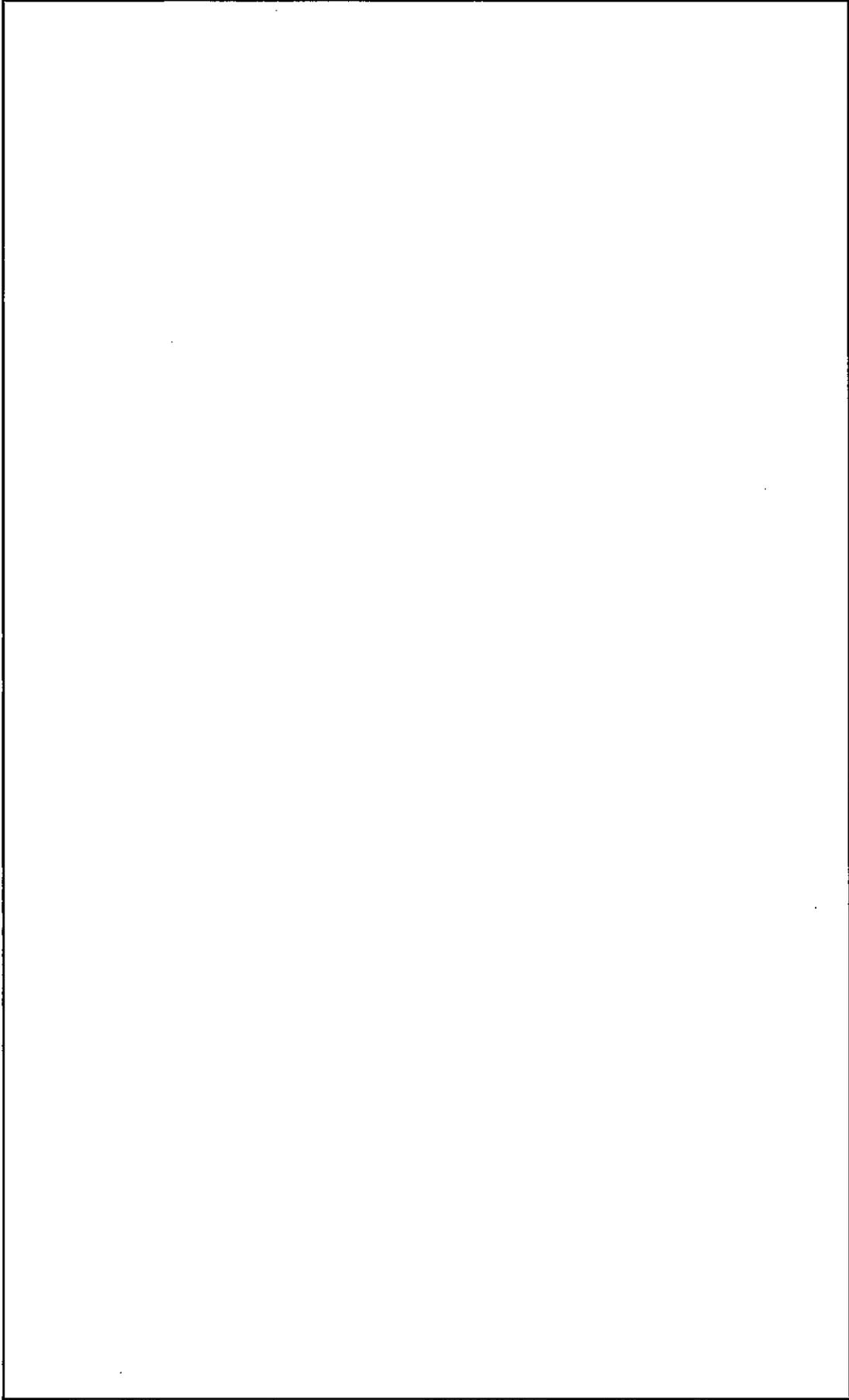
図(イ)-11 14×14-8 グリッド型燃料集合体構造図(例)



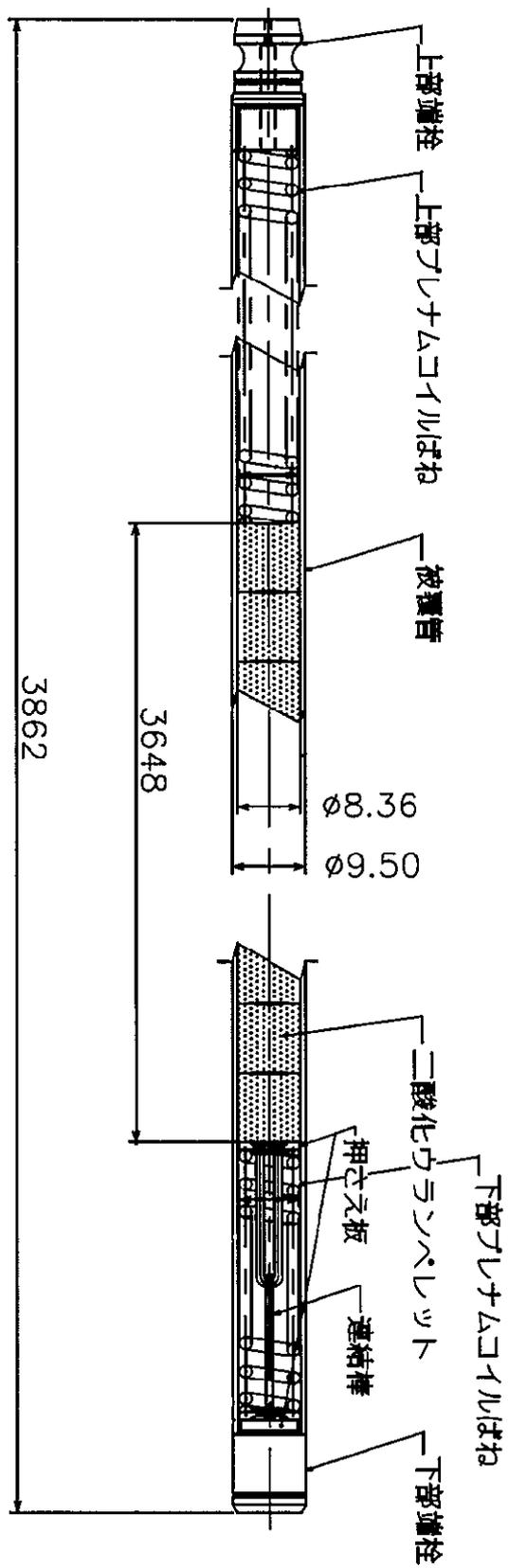
図(イ)-12 15×15型燃料集合体構造図(例)



図(イ)-13 17×17型燃料集合体構造図(例)



図(イ)-14 燃料棒組立体(例)



図(イ)-15 燃料棒構造図 (例)

(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析

本章では、本輸送物の設計が「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（昭和53年総理府令第57号）」（以下「規則」と呼ぶ）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（平成2年科学技術庁告示第5号）」（以下「告示」と呼ぶ）に定められるA型核分裂性輸送物の技術基準に適合していることを示す。

(ロ)-A 構造解析

A.1 構造設計

A.1.1 概 要

本輸送容器は、1体又は2体の新燃料集合体及び燃料棒組立体を輸送するためのものである。輸送容器は内部を保護するケースと収納物である燃料集合体及び燃料棒組立体を載せるための、18個のショックマウントが取付けられたショックマウントフレーム及びストロングバックよりなり、輸送中の振動及び衝撃を吸収するように設計されている。ケースは円筒形であり、上側ケースと下側ケースに分かれ、フランジ面をロッドボルトで締め付け固定する。ケースは2重構造のオーステナイト系ステンレス鋼製でこれに補強用リブとフランジを溶接して作られており、ガスケットを使用して密閉構造としている。輸送容器には、クレーン等による吊り上げのためのスタッキングブラケットが取付けられ、輸送物総重量の3倍の荷重に耐える構造となっている。

輸送容器外形は円筒状で外表面の突起物は必要最小限に留められているため、雨水がたまりにくく、除染も容易である。

A.1.2 設計基準

本解析では、規則及び告示に規定されるA型核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下及び特別の試験条件下における輸送容器の構造を解析し、技術上の基準に適合することを示す。

解析の結果は、安全率を用いて整理し、安全率が1以上となることを確認する。

$$\text{安全率} = \frac{\text{解析基準値}}{\text{解析値}}$$

表(ロ)A-1には、解析項目毎に、対象となる部分の参照図、材質、設計温度及び対象となる部分に加わる設計負荷について記述している。また、解析方法に関しては、本文中で適用した式や手法を、その解析基準とともに記述している。解析基準値としては、引張応力に対して降伏応力を、また、せん断応力に対して降伏応力の0.577倍の値を使用する。なお、溶接効率については、鋼材の場合は、「溶接・接合便覧（第2版）」で定められている数値を、被覆管材については、焼なましの効果を考えた数値を採用する。

表(ロ)A-1 構造解析設計基準
(1/5)

解析項目	条 件										備 考
	参照図	材 質	温 度	設計負荷		要 素		解析方法		解析基準	
				種 類	負荷係数	種 類	要 素	適用式または要素	解析方法		
1. 化学的及び電気的反応 (1) 化学的反応 (2) 電気的反応	—	—	-40℃ ~□℃	腐 食	—	反応性 電位性	反応性の有無 異種材質間の電位差の有無	—	無 無	—	—
	—	SUS304	-40℃	最低温度	1	低温強度	強度低下の有無 (低温脆性)	無	無	—	—
	—	SCM435	-40℃	最低温度	1	低温強度	強度低下の有無 (低温脆性)	無	無	—	—
	—	シリコゴム ブチルゴム	-40℃	最低温度	1	性能低下 性能低下	性能低下の有無 性能低下の有無	無 無	無 無	—	—
3. 密封装置	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	該当せず
4. 吊上装置 (1) スタッペグブラケット A部 (2) スタッペグブラケット B部	図(ロ)A-6	SUS304	20℃	輸送物重量	3	せん断力	$\tau_A = F_V / A_A$	0.577 σ_y	—	—	—
	図(ロ)A-7	SUS304	20℃	輸送物重量	3	せん断力 引張応力 曲げ応力 組合せ応力	$\tau_B = F_{HA} / A_B$ ($\sigma_{BT} = F_V / A_B$) ($\sigma_{BB} = F_{HTL} / Z_B$) $\sigma_{BC} = \sqrt{(\sigma_{BT} + \sigma_{BB})^2 + 3\tau^2 B}$	σ_y	—	—	—

表(ロ)A-1 構造解析設計基準
(2/5)

解析項目	条件										備考
	参照図	材質	温度	種類	設計負荷		要素	解析方法		解析基準	
					負荷係数	種類		適用式または要素	解析基準		
(3) スクェアグブレット 固定 A 部溶接部 (4) スクェアグブレット 固定 B 部溶接部 (5) ロットボルト (6) 胴	図(ロ)A-7	SUS304	20 °C	輸送物重量	3	引張応力 せん断応力 組合せ応力 せん断力	$\sigma_{AT} = F_V / A_A$ $\tau_A = F_{HA} / A_A$ $\sigma_{AC} = \sqrt{(\sigma_{AT})^2 + \tau_A^2}$ $\tau_B = F_{HT} / A_B$	$0.61 \sigma_y$ $0.35 \sigma_y$	該当せず		
	図(ロ)A-7	SUS304	20 °C	輸送物重量	3	引張応力	$\sigma = (3WG + PS) / NA$	σ_y			
	図(イ)-9	SCM435	20 °C	輸送物重量	3	曲げ応力 圧縮応力 最大応力	$\sigma_B = M/Z$ $\sigma_C = 2F_{HM}/A$ $\sigma_{CT} = \sigma_B + \sigma_C$	σ_y			
	図(ロ)A-5	SUS304	20 °C	輸送物重量	—	—	—	—			
	5. 固縛装置	—	—	—	—	—	—	—		—	
6. 圧力 (1) 燃料棒 (2) 燃料棒溶接部	図(イ)-15	ジロコイ-4 ジロコイ-4 ジロコイ-4 ジロコイ-4	20 °C	周囲圧力	1	引張応力	$\sigma = Pr/t$	σ_y			
	—	—	20 °C	周囲圧力	1	引張応力	$\sigma = Pdi^2 / (do^2 - di^2)$	$0.6 \sigma_y$			
7. 振動	—	—	—	—	—	振動	亀裂、破損の有無	—			

表(ロ)A-1 構造解析設計基準
(3/5)

解析項目	条件							備考
	参照図	材質	温度	設計負荷		解析方法		
				種類	負荷係数	要素	適用式または要素	
1. 熱応力 (1) ケース胴部 (2) ケース胴溶接部 (3) ケースドーム板 (4) ケースドーム板と補強リブ (5) ロットボルト (6) 燃料棒 (7) 燃料棒溶接部 2. 水噴霧 3. 自由落下 (1) 垂直落下 (2) 水平落下	—	SUS304	□ °C	最大内圧	1	引張応力	$\sigma_{\theta} = Pr/t$	σ_y
	—	SUS304	□ °C	最大内圧	1	"	$\sigma_w = Pr/2tw$	$0.61\sigma_y$
	—	SUS304	□ °C	最大内圧	1	"	$\sigma_r = 0.4012Pr^2/t^2$	σ_y
	—	SUS304	□ °C	最大内圧	1	"	$\sigma_t = Wl^2/8z$	σ_y
	—	SUS304	□ °C	最大内圧	1	引張応力	$\sigma = (3W+PS)/NA$	σ_y
	図(イ)-15	ジルコニウム合金	□ °C	最大内圧	1	引張応力	$\sigma = Pr/t$	σ_y
	図(イ)-15	ジルコニウム合金	□ °C	最大内圧	1	引張応力	$\sigma = Pdi^2/(do^2-di^2)$	$0.6\sigma_y$
—	—	20 °C	耐圧試験	—	—	漏えい	圧力降下の有無	無
—	SUS304	20 °C	垂直に 1.2 m より落下	1	変形	変形量の評価 (ひずみエネルギーの積分)	変形量の評価 (ひずみエネルギーの積分)	—
—	SUS304	20 °C	水平に 1.2 m より落下	1	変形	変形量の評価 (ひずみエネルギーの積分)	変形量の評価 (ひずみエネルギーの積分)	—
一般の試験条件								

表(ロ)A-1 構造解析設計基準
(4/5)

解析項目	条件							備考
	参照図	材質	温度	設計負荷		解析方法		
				種類	負荷係数	要素	適用式または要素	
(3) コーナー落下 4. 積み重ね (1) ケース	図(ロ)A-12	SUS304	20 °C	□で 1.2 m より落下	1	変形	変形量の評価 (ひずみエネルギーの積分)	—
	図(ロ)A-15	SUS304	20 °C	輸送物重量の 5倍	1	曲げ応力	$\sigma = \frac{M}{Z}$	σ_y
5. 貫通 (1) ケース	—	SUS304	20 °C	丸棒の 1 m から 落下	1	くぼみの体積	くぼみの体積の評価 (原型容器試験)	1 辺の 10cm の立方体の 包含
一般の試験条件								

表(ロ)A-1 構造解析設計基準
(5/5)

解析項目	条件							備考
	参照図	材質	温度	設計負荷		解析方法		
				種類	負荷係数	要素	適用式または要素	
1. 落下試験 I (1) 収納物 (2) ケース (3) 中性子吸収材	図(イ)-10 ~ 図(イ)-14 図(イ)-1 図(イ)-2	ジルコイ-4 ジルコイ合金 SUS304 ホロン入りステン レス鋼	20 °C 20 °C 20 °C	9 m 垂直落下	1	圧縮圧力	圧縮応力 座屈 変形量の評価(原型容器試験) 変形量の評価 (ひずみエネルギーの積分) 輸送容器の健全性 (原型容器試験)	σ_y 座屈応力 — —
				9 m より落下	1	座屈		
				9 m より落下	1	変形		
2. 落下試験 II (1) 収納物 (2) ケース (3) 中性子吸収材	図(イ)-10~ 図(イ)-14 図(イ)-1 図(イ)-5	ジルコイ-4 ジルコイ合金 SUS304 ホロン入りステン レス鋼	20 °C 20 °C 20 °C	1 m より落下	1	健全性	収納物の健全性 (原型容器試験) 変形量の評価(原型容器試験) 輸送容器の健全性 (原型容器試験)	— — —
				1 m より落下	1	健全性		
				1 m より落下	1	変形 健全性		
3. 浸漬試験	—	—	—	—	—	—	—	—

特別の試験条件

A.2 重量及び重心

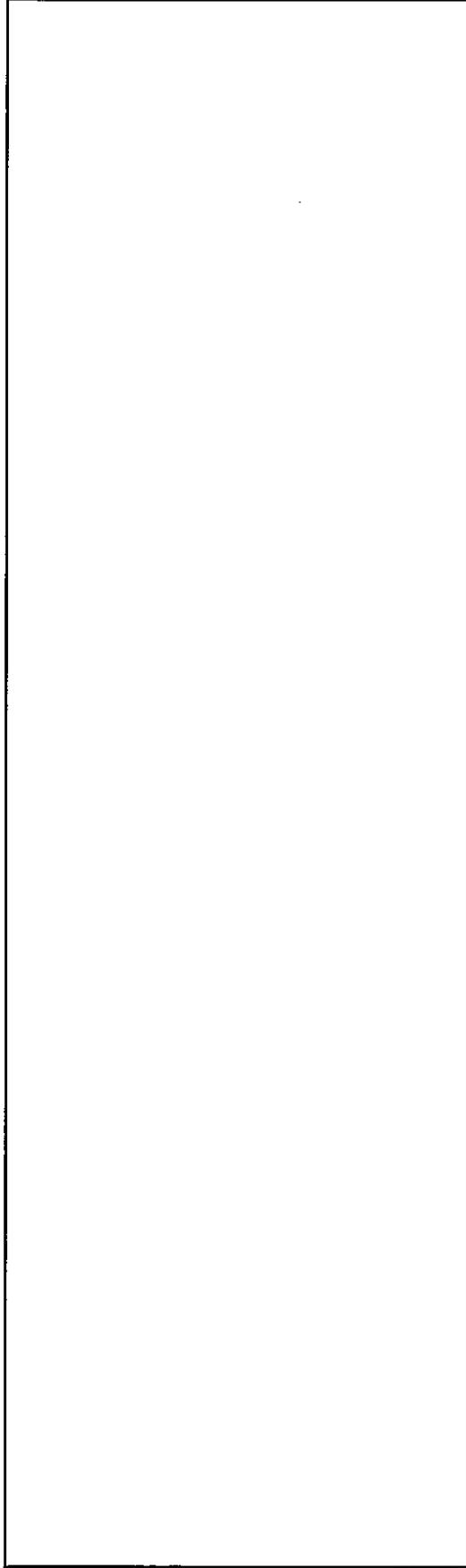
輸送物及びその主な構成物の重量を表(ロ)A-2に示す。輸送物の重心位置は図(ロ)A-1に示すとおりである。

表(ロ)A-2 輸送物の重量 (最大重量)

(単位: kg)

燃料集合体	14×14 型 15×15 型 17×17 型 (タイプ 64) 17×17 型 (タイプ 57)	
燃料棒組立体	10×10 型	
防振構造物	(ショックマウントフレーム、ストロングハック)	
輸送容器ケース	上側ケース 下側ケース及び付属部品	
輸送物総重量		

なお、解析計算では、輸送物最大重量 3,800 kg、収納物が積載された防振構造物を 2,250 kg として評価する。



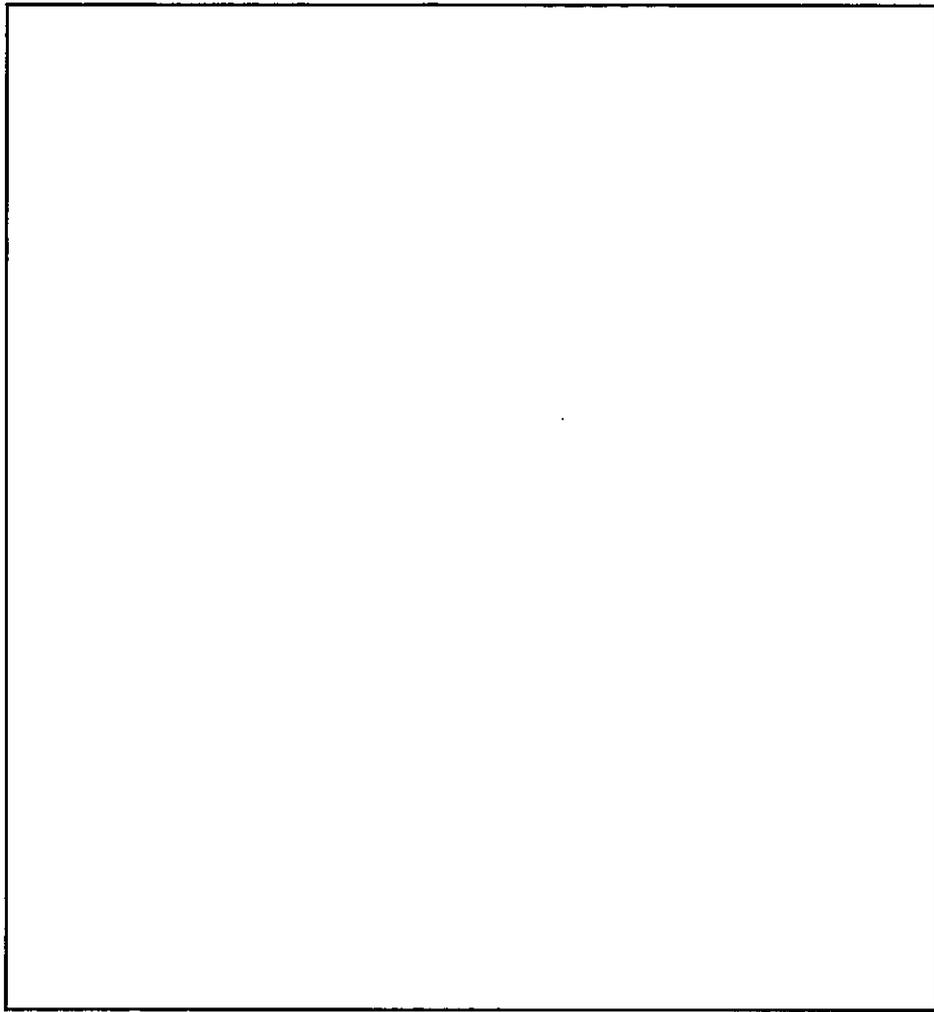
図(ロ)A-1 輸送物の重心位置

A.3 材料の機械的性質

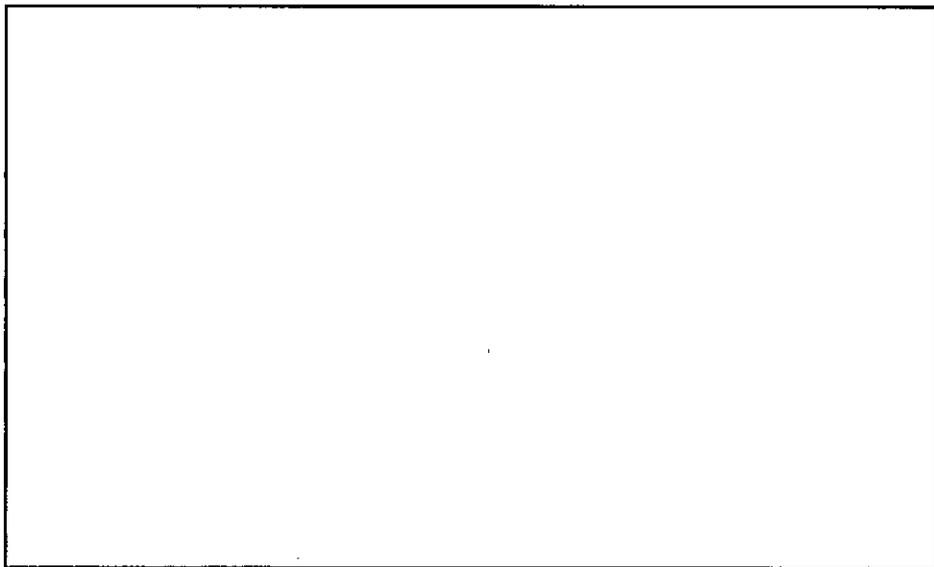
輸送容器を構成する主要部品用材料の機械的性質及び解析基準値を表(口)A-3に示す。

緩衝体として働くショックマウントの荷重と変形量の関係を図(口)A-2に示す。図(口)A-3に試験中の写真を示す。図(口)A-2の荷重と変形量の関係は、ショックマウント2個を並列にして、試験した結果を1個の値に換算したものである。また、2004年2月～2021年11月の期間に輸送容器に装着していたショックマウントに対して同様の試験を実施し、経年変化の影響を確認している(参考資料(口)-A.6参照)。

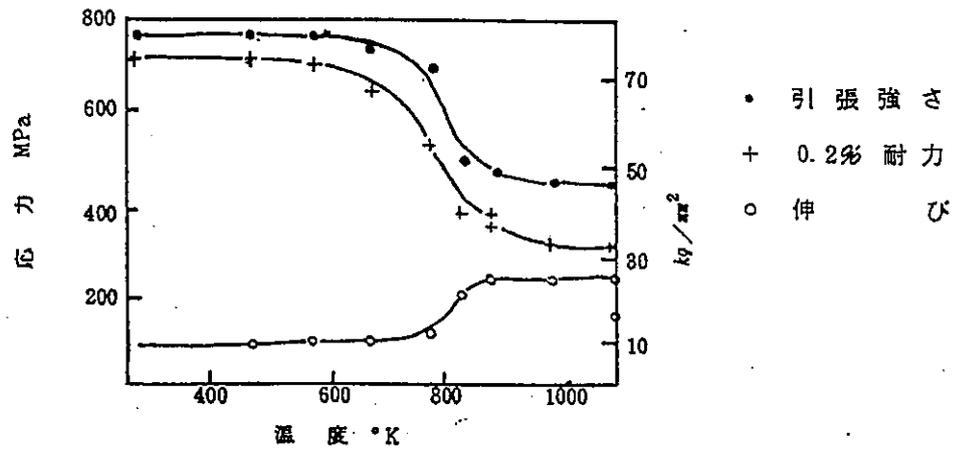
耐圧部のうちジルカロイ-4の溶接効率は、ジルカロイ-4が溶接により完全に焼なまされると考えると、図(口)A-4より□となる。



図(ロ)A-2 ショックマウントのせん断ばね定数試験結果



図(ロ)A-3 ショックマウントのせん断ばね定数試験



70%加工のジルカロイ-4 被覆管の軸方向の引張強さ、0.2%耐力、伸びに対する 1 時間加熱の効果

図(ロ)A-4 ジルカロイ被覆管の強さに対する焼きなましの効果

(出典) R.A.Holt, W.Evans & B.A.Cheadles, AECL-5107 (1975)

表(ロ)A-3 主要部品用材料の機械的性質

材料	機械的性質		解析基準値		備考
	温度 (°C)	降伏応力 (MPa)	縦弾性係数 (MPa)	許容せん断応力 (MPa)	
ジルカロイ-4 ジルコニウム合金	□	□ (□°C)	□ (□°C)	-	通常部：□
		※1 通常部の許容引張応力(□MPa)に焼きなましによる影響(□)を乗じた値			溶接部：□(※1)
ステンレス鋼 SUS304	20	205	195,000	118 溶接部：72	205 溶接部：125
	75	183	191,000	105 溶接部：64	183 溶接部：111
SCM435	20	785	205,000	452	785
	75	712	201,000	407	712

A.4 輸送物の要件

A.4.1 化学的及び電氣的反応

輸送容器及び輸送容器と収納物の間で接触する異種材料の一覧を表(ロ)A-4に示す。

通常時においては、輸送容器に使用されている材料の組み合わせで、顕著な化学的または異種材料の接触による電氣的反応を生ずることはない。

表(ロ)A-4 輸送容器と収納物の接触する異種材料

材 料 名	場 所
ステンレス鋼 — ポリエチレン	(燃料集合体と梱包の袋)
718 合金 — ポリエチレン	(同 上)
ジルカローイ-4 ジルコニウム合金 — ポリエチレン	(燃料集合体と梱包の袋) (燃料棒と燃料棒組立体)
ポリエチレン — シリコンゴム	(梱包の袋と緩衝材)
シリコンゴム — ステンレス鋼	(ガスケットと構造材) (緩衝材と燃料棒組立体)
ステンレス鋼 — ウレタンゴム	(構造材とスキッド)
ステンレス鋼 — ブチルゴム	(構造材とショックマウント)

A.4.2 低温強度

輸送容器に使用されている材料は SUS304、SCM435、シリコンゴム等で、これらは—40℃の環境でも十分耐え、機能を損なうことはない。(参考資料(ロ)-A.4 参照)

輸送容器及び収納物に液体は使用されておらず凍結はない。

A.4.3 密封装置

本輸送物の密封境界としては燃料棒被覆管が該当し、本輸送容器には密封装置はない。

A.4.4 吊上装置

本輸送容器の吊上装置は、図(イ)-3 に示すスタッキングブラケットである。スタッキングブラケットは吊上げ孔を持つステンレス鋼製で上側ケース本体に溶接で固定されている。吊上装置は、輸送物の急激な吊上げに対しても耐えるよう輸送物総重量の 3 倍の荷重がかかっ

た時でも十分安全な構造になっている。

ここで、スタッキングブラケット板厚部及びその固定溶接部並びに吊上げ時ロッドボルトにかかる応力を計算する。

吊上作業は図(ロ)A-5に示すように、ワイヤ4本を用いて行う。この時吊上用具であるスタッキングブラケットに発生する応力を求める。

図(ロ)A-5の吊り角度よりスタッキングブラケット1個に加わる荷重は、輸送物総重量を吊上げた際ワイヤ4本中1本に掛かる荷重を3倍したものであるので次式で表わされる。

$$F_v = \frac{3}{4}WG$$

$$F_{HA} = F_v / \tan(90 - \theta)$$

$$F_{HT} = F_v / \tan(90 - \phi)$$

ここで

F_v スタッキングブラケットに働く荷重の鉛直成分 N

F_{HA} スタッキングブラケットに働く荷重の水平長手方向成分 N

F_{HT} スタッキングブラケットに働く荷重の水平幅方向成分 N

W 輸送物総重量 kg

G 重力加速度 9.80665 m/s

θ 図(ロ)A-5の長手方向面におけるワイヤと鉛直線のなす角 °

ϕ 図(ロ)A-5の幅方向面におけるワイヤと鉛直線のなす角 °

よって

$$F_v = \text{} N$$

$$F_{HA} = \text{} N$$

$$F_{HT} = \text{} N$$

A.4.4.1 スタッキングブラケットのA断面に発生する応力

図(ロ)A-6のA断面におけるせん断応力は次式で表わされる。

$$\tau_A = \frac{F_v}{A_A}$$

ここで

τ_A A断面に生じるせん断応力 MPa

F_v A断面にかかる荷重 N

A_A A断面の断面積 mm²

$$A = t_R l_R + t_S l_S = \boxed{} \text{ mm}^2$$

t_R 補強板の板厚 $\boxed{}$ mm

l_R 補強板の A 断面での長さ $\boxed{}$ mm

t_S スタッキングブラケット厚さ $\boxed{}$ mm

l_S A 断面でのスタッキングブラケットの長さ $\boxed{}$ mm

これらを用いると

$$\tau_A = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ MPa}$$

スタッキングブラケット及び補強板の材質は SUS304 であり、許容せん断応力は表 (ロ)A-3 より 118 MPa となり発生応力は基準値より小さい。

A.4.4.2 スタッキングブラケットの B 断面に発生する応力

B 断面には鉛直荷重による引張応力、水平長手方向成分荷重によるせん断応力及び水平幅方向成分荷重による曲げ応力の各応力が発生する。

(1) せん断応力

せん断応力は次式で表わされる。

$$\tau_B = \frac{F_{HA}}{A_B}$$

ここで

τ_B B 断面に生じるせん断応力 MPa

F_{HA} スタッキングブラケットに働く荷重の水平長手方向成分 N

A_B B 断面の断面積 mm²

$$A_B = l_{B1}t_R + l_{B2}t_S = \text{} \text{ mm}^2$$

l_{B1} B 断面（補強板）の長さ mm

l_{B2} B 断面（スタッキングブラケット）の長さ mm

t_R 補強板の板厚 mm

t_S スタッキングブラケット厚さ mm

これらを用いると

$$\tau_B = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{ MPa}$$

(2) 引張応力

引張応力は次式で表わされる。

$$\sigma_{BT} = \frac{F_V}{A_B}$$

ここで

σ_{BT} B 断面に生じる引張応力 MPa

F_V スタッキングブラケットに働く荷重の鉛直成分 N

A_B B 断面の断面積 mm²

これらを用いると

$$\sigma_{BT} = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{ MPa}$$

(3) 曲げ応力

曲げ応力は次式で表わされる。

$$\sigma_{BB} = \frac{F_{HT}L}{Z_B}$$

ここで

σ_{BB} B断面に生じる曲げ応力 MPa

F_{HT} スタッキングブラケットに働く荷重の水平幅方向成分 N

L B断面から荷重作用点までの距離 mm

Z_B B断面の断面係数 mm^3

$$Z_B = \frac{A_B}{6}(t_R + t_S) = \text{} \text{mm}^3$$

A_B B断面の断面積 mm^2

t_R 補強板の板厚 mm

t_S スタッキングブラケット厚さ mm

これらを用いると

$$\sigma_{BB} = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{MPa}$$

(4) 組合せ応力

垂直応力とせん断応力が同時に作用するときの組合せ応力は次式で表わされる。

$$\sigma_{BC} = \sqrt{(\sigma_{BT} + \sigma_{BB})^2 + 3\tau_B^2}$$

ここで

σ_{BC} 組合せ応力 MPa

σ_{BT} 引張応力 MPa

σ_{BB} 曲げ応力 MPa

τ_B せん断応力 MPa

これらを用いると

$$\sigma_{BC} = \text{} \text{MPa}$$

スタッキングブラケット及び補強板の材質は SUS304 であり、組合せ応力に対する許容引張応力は表(ロ)A-3より 205 MPa である。したがって、スタッキングブラケットに発生する応力は基準値より小さく安全である。

A.4.4.3 スタッキングブラケット固定 A 部溶接部に発生する応力

溶接部は図(ロ)A-7に示されている。このうち A 部は鉛直荷重 (F_V) と水平長手方向荷重 (F_{HA}) を受ける。

(1) 引張応力

溶接部に生ずる引張応力は次式で表わされる。

$$\sigma_{AT} = \frac{F_V}{A_A}$$

ここで

σ_{AT} A部に生じる引張応力 MPa

F_V スタッキングブラケットに働く荷重の鉛直成分 N

A_A A部ののど厚による断面積 mm^2

$$A_A = 2 \times lw \frac{tw}{\sqrt{2}} = \text{} \text{mm}^2$$

lw A部の長さ mm

tw 溶接脚長 mm

これらを用いると

$$\sigma_{AT} = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{MPa}$$

(2) 長手方向の荷重によるせん断応力

水平荷重のうち長手方向成分の荷重により A 部に生ずるせん断応力は次式で表わされる。

$$\tau_A = \frac{F_{HA}}{A_A}$$

ここで

τ_A 長手方向荷重によるせん断応力 MPa

F_{HA} スタッキングブラケットに働く荷重の水平長手方向成分 N

A_A A部ののど厚による断面積 mm^2

これらを用いると

$$\tau_A = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{MPa}$$

(3) 組合せ応力

垂直成分とせん断応力が同時に作用するときの組合せ応力は次式で表わされる。

$$\sigma_{AC} = \sqrt{\sigma_{AT}^2 + 3\tau_A^2}$$

ここで

σ_{AC} 組合せ応力 MPa

σ_{AT} 引張応力 MPa

τ_A 長手方向荷重によるせん断応力 MPa

これらを用いると

$$\sigma_{AC} = \boxed{} \text{MPa}$$

溶接部の組合せ応力に対する許容応力は表(ロ)A-3より 125 MPa である。したがって、A 部溶接部に発生する応力は基準値より小さく安全である。

A.4.4.4 スタッキングブラケット固定 B 部溶接部に発生する応力

水平荷重のうち幅方向成分の荷重により B 部に生ずるせん断応力は次式で表わされる。

$$\tau_B = \frac{F_{HT}}{A_B}$$

ここで

τ_B 幅方向荷重によるせん断応力 MPa

F_{HT} スタッキングブラケットに働く荷重の水平幅方向成分 $\boxed{}$ N

A_B B 部ののど厚による断面積 mm^2

$$A_B = 2 \times l_w \frac{t_w}{\sqrt{2}} = \boxed{} \text{mm}^2$$

W B 部の長さ $\boxed{}$ mm

t_w 溶接脚長 $\boxed{}$ mm

これらを用いると

$$\tau_B = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{MPa}$$

溶接部のせん断に対する許容応力は表(ロ)A-3より 72 MPa である。したがって B 部溶接部に発生する応力は基準値より小さく安全である。

A.4.4.5 吊上げ時、ロッドボルトに発生する応力

上側ケースと下側ケースを締め付けるために図(イ)-9 に示すロッドボルトを使用する。

吊上げ時にこのロッドボルトには、輸送物の総重量より上側ケースを除いた重量及び内圧による応力がかかるものとして解析する。

$$\sigma = \frac{3WG + PS}{NA}$$

ここで

σ ロッドボルトに発生する応力 MPa

W 輸送物総重量より上側ケース重量を除いた重量 $\boxed{}$ kg

N ロッドボルトの数 44 個

P 内外圧差 $\boxed{}$ MPa (「B.4.4 最大圧力」において太陽輻射を考慮して得られた輸送容器最大内圧を保守的に使用)

S 下側ケースの投影断面積 mm²

A ボルト断面積 150.3 mm² (M16)

これらを用いると、

$$\sigma = \text{} \text{ MPa}$$

ロッドボルトの材質は SCM435 で許容引張応力は表(ロ)A-3より降伏応力 785 MPa である。したがって、ロッドボルトに発生する応力は基準値より小さく安全である。

A.4.4.6 吊上げ時、ケース胴に発生する応力

ロッドボルトの締付けにより胴を一体とみなしたとき、胴に発生する曲げ応力と圧縮応力を計算する。

(1) 曲げ応力

胴をスタッキングブラケットを支点として中央部に全重量の3倍の荷重(3W)が加わったときの梁とみなすと、胴中央部に生じる曲げ応力は次式で表わされる。

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

ここで

σ_B 胴に生じる曲げ応力 MPa

M 胴中央部の曲げモーメント N

$$M = \frac{3WGL}{4} = \text{} \text{ N}\cdot\text{m}$$

W 輸送物総重量 kg

L スタッキングブラケット間距離 mm

Z 胴の断面係数 mm³

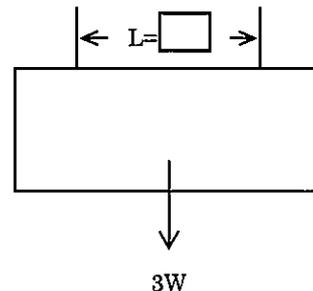
$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} = \text{}$$

D_o 胴外径 mm

D_i 胴内径 mm

これらを用いると

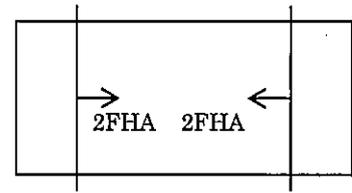
$$\sigma_B = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{ MPa}$$



(2) 圧縮応力

スタッキングブラケットでの水平長手方向荷重により生じる圧縮応力は次式で表される。

$$\sigma_c = \frac{2F_{HA}}{A}$$



ここで

σ_c 胴に生じる圧縮応力 MPa

F_{HA} スタッキングブラケットに働く荷重の水平長手方向成分 88,642.8 N

A ケースの胴断面積 mm²

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

D_o 胴外径 mm

D_i 胴内径 mm

これらを用いると

$$\sigma_c = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ MPa}$$

(3) 胴に生じる最大応力

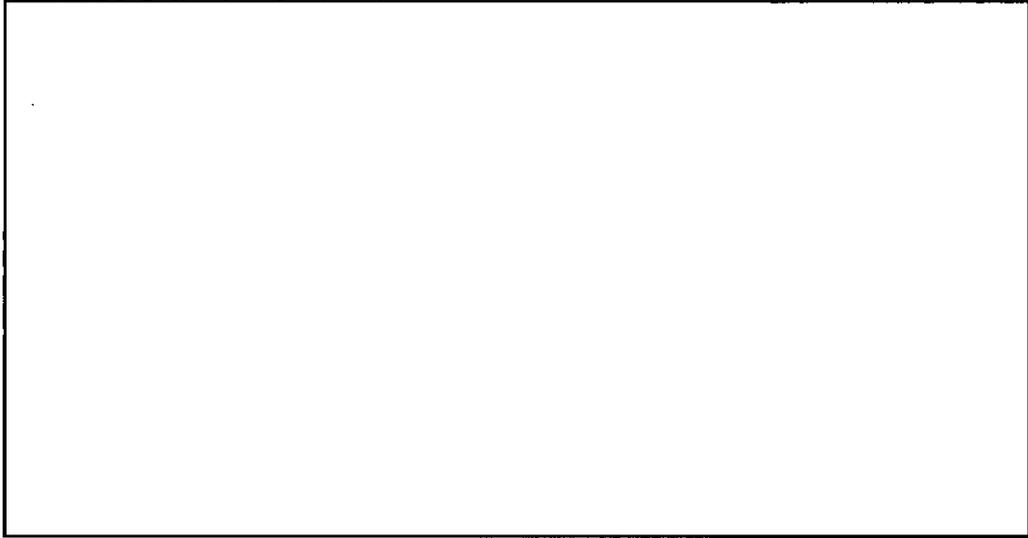
胴に生じる最大応力は圧縮側で以下ようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{CT} &= \sigma_B + \sigma_c \\ &= \boxed{} + \boxed{} = \boxed{} \text{ MPa} \end{aligned}$$

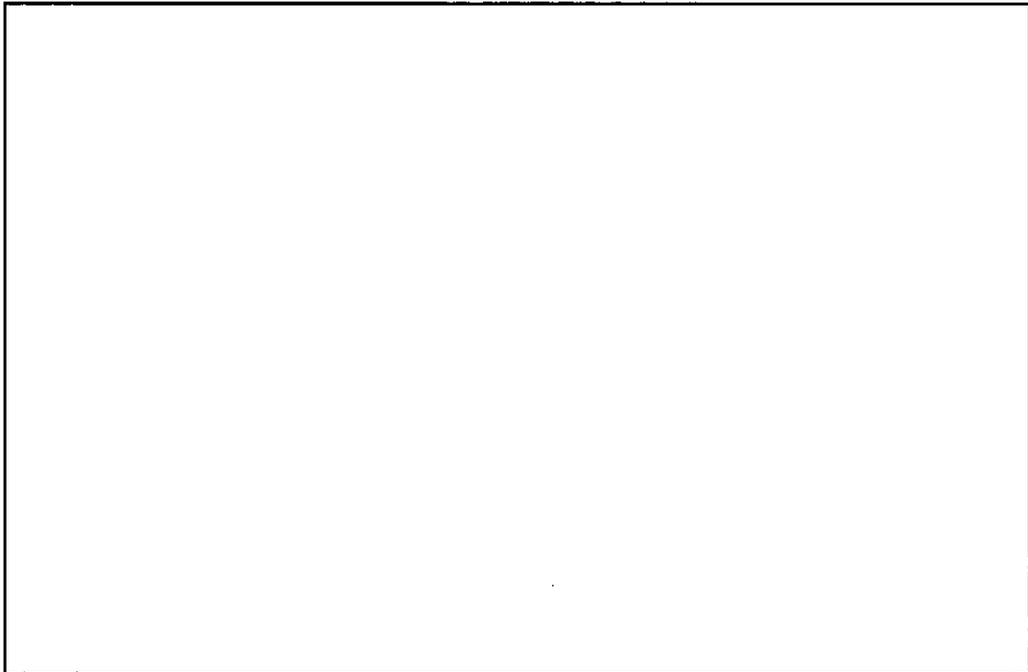
胴の材質は SUS304 であり、許容圧縮応力は表(ロ)A- 3 より 205 MPa である。したがって胴に発生する応力は基準値より小さく安全である。



図(□)A-5 吊上げ作業



図(ロ)A-6 スタッキングブラケットの応力評価断面



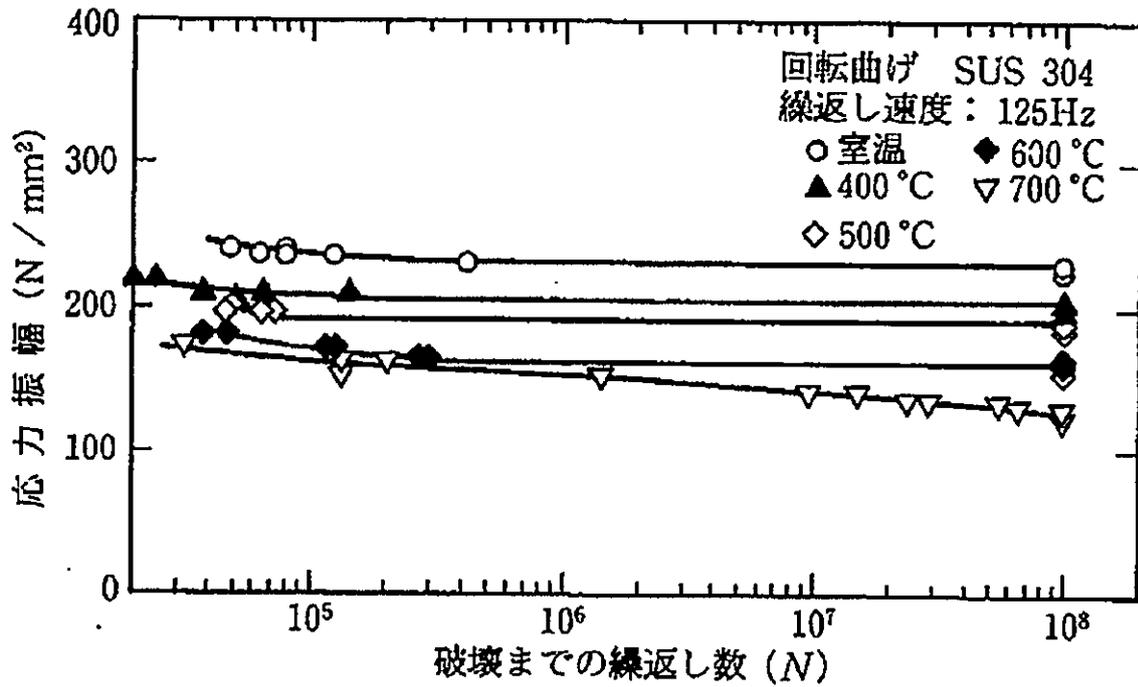
図(ロ)A-7 スタッキングブラケットの固定溶接部

A.4.4.7 繰り返し応力の評価

A.4.4.1~A.4.4.4、A.4.4.6 にてステンレス鋼製の吊り部に及ぼす応力を評価した結果、応力は最大 MPa であり、応力振幅は ÷ 2 より MPa である。本輸送容器の使用予定期間は 80 年であり、使用期間を通しての輸送予定回数は計 400 回である。また、輸送容器の吊り上げ予定回数は輸送 1 回あたり 10 回、輸送とは別に年間 20 回であり、使用期間を通しての吊り上げ予定回数は計 5,600 回 (=400×10 + 80×20) である。繰り返し応力評価においては、使用予定より保守的な条件として、使用期間を通じた輸送回数を予定の 2 倍 (400×2=800 回)、輸送以外の年間吊り上げ回数を予定の 2 倍 (20×2=40 回) と想定し、計 11,200 回 (=800×10 + 80×40) の応力発生を考慮する。図(ロ)A-8 のステンレス鋼の疲労曲線によると、少なくとも 200 MPa 以下の応力振幅では室温から 400°C の環境下において 10⁷ 回以上繰り返し応力が発生しても疲労破壊が生じることはない。

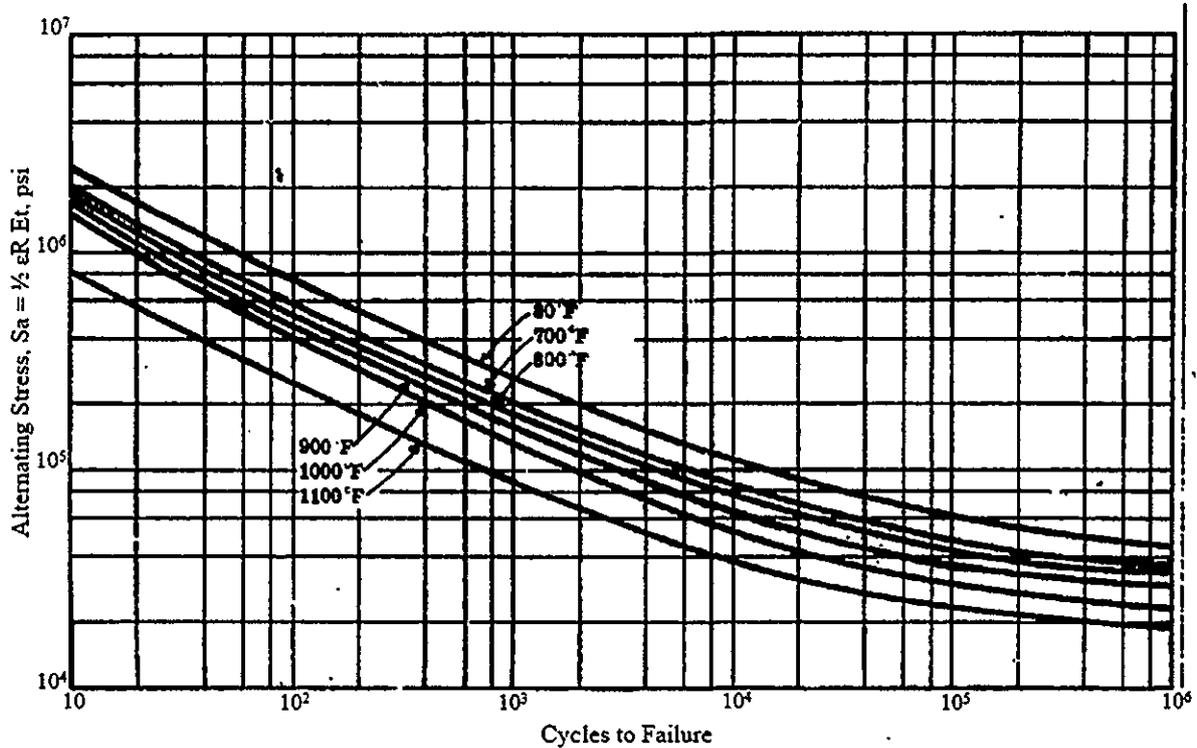
A.4.4.5 にて、クロムモリブデン鋼製のボルトに発生する応力を評価した結果、応力は MPa であり、応力振幅は ÷ 2 より MPa である。ステンレス鋼と同様に応力が計 11,200 回発生すると考慮する。図(ロ)A-9 のクロムモリブデン鋼の疲労曲線によると、少なくとも 206 MPa (3.0×10⁴ psi) 以下の応力振幅では室温から 371°C (700° F) の環境下において 10⁶ 回以上繰り返し応力が発生しても疲労破壊が生じることはない。

以上のことから、吊り上げによる繰り返し応力によって疲労破壊が生じることはない。



図(ロ)A-8 ステンレス鋼疲労曲線

(出典) ステンレス鋼便覧—第3版—ステンレス協会(1995年1月)



図(ロ)A-9 クロムモリブデン鋼疲労曲線

(出典) 多目的高温ガス実験炉用 2 1/4 Cr-Mo 鋼の機械的性質に関するデータの調査 (1978年11月) 奥達雄、菊山 紀彦、深谷 清、古平 恒夫著

A.4.5 固縛装置

輸送中に輸送物が荷くずれ、転落等の事故を起こさぬようにワイヤ及び移動止め等を用いて固縛される。このため、本輸送容器に固縛装置は装備されていない。

A.4.6 圧力

周囲の圧力が 60 kPa まで低下した場合に密封境界である燃料棒の健全性について評価する。燃料棒の密封は屋内で実施されることから初期条件を 0 °C とし、評価時の温度は(ロ)B 項に示す解析結果より一般の試験条件下における輸送物の最高温度 \square °C とする。0 °C で梱包し、燃料棒温度が 70 °C まで達した場合の燃料棒内圧を求めると絶対圧 \square MPa となる(「B4.4 最大内圧」参照)。周囲の圧力が絶対圧で 60kPa まで低下すると、密封境界である燃料棒との差圧である \square MPa のゲージ圧が被覆管に作用することになる。

(1) 内圧による被覆管に発生する応力

被覆管の材質は、ジルカローイ-4 及びジルコニウム合金であり、それについて発生する応力を評価した。なお、17×17 型タイプ 64 に対する評価は被覆管肉厚の薄い 17×17 型タイプ 57 の結果に包絡されることから評価を省略する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr}{t}$$

ここで、

σ_{θ} 被覆管にかかる円周方向応力 MPa

P 燃料棒に作用する最大内外圧差 \square MPa

r 被覆管内半径 $\left\{ \begin{array}{l} 4.70 \text{ mm (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型)} \\ 4.18 \text{ mm (17} \times \text{17 型タイプ 57)} \end{array} \right.$

t 被覆管肉厚 $\left\{ \begin{array}{l} 0.66 \text{ mm (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型)} \\ 0.57 \text{ mm (17} \times \text{17 型タイプ 57)} \end{array} \right.$

これらを用いると

$$\sigma_{\theta} = \square \text{ MPa (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型)}, \square \text{ MPa (17} \times \text{17 型タイプ 57)}$$

被覆管の材質は、ジルカローイ-4 及びジルコニウム合金であり、引張応力が働いているので、基準値は、表(ロ)A-3 より \square MPa である。

従って、燃料棒の被覆管に発生する応力は、基準値より小さく安全である。

(2) 内圧による燃料棒端部の溶接部に発生する応力

この場合も、燃料棒の材質についてそれぞれに発生する応力を評価した。燃料棒端部の溶接部にかかる軸方向応力を、次式で計算する。

$$\sigma = \frac{\pi d_i^2 P / 4}{\pi (d_o^2 - d_i^2) / 4} = \frac{d_i^2 \cdot P}{d_o^2 - d_i^2}$$

ここで

P 燃料棒に作用する最大内外圧差 MPa

d_o 燃料棒外径 $\left\{ \begin{array}{l} 10.72 \text{ mm (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型)} \\ 9.50 \text{ mm (17} \times \text{17 型タイプ 57)} \end{array} \right.$

d_i 燃料棒内径 $\left\{ \begin{array}{l} 9.40 \text{ mm (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型)} \\ 8.36 \text{ mm (17} \times \text{17 型タイプ 57)} \end{array} \right.$

これらを用いると

$$\sigma = \text{ MPa (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型), MPa (17} \times \text{17 型タイプ 57)}$$

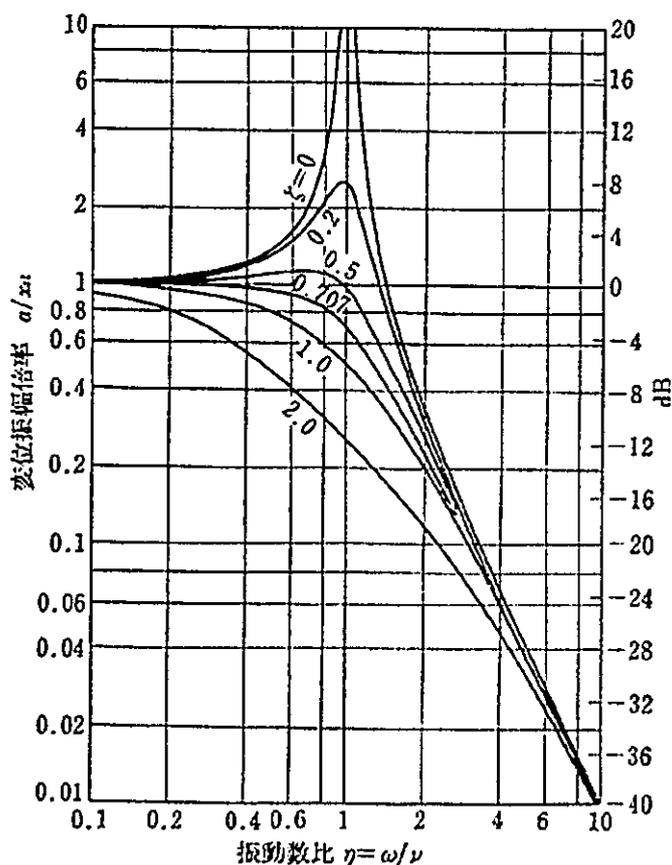
溶接部には、引張応力が働いているため、基準値は、表(ロ)A-3 より MPa である。

従って、燃料棒に発生する応力は、基準値より小さく安全であり放射性物質の漏えいはない。

A.4.7 振動

固有振動数解析の結果、本輸送物の固有振動数は \square Hz である（詳細は、「参考資料(ロ)-A.7」参照）。一般的に運搬中にトラック、トレーラー等から受ける励振力の周波数は最大でも \square Hz 未満であり、本輸送物の固有振動数と差がある。図(ロ)A-10 に示すように、振動数比 \square ($=\square$) の場合、減衰を保守的に考慮しない場合でも変位振幅倍率は \square %程度である。一般的に輸送中にトラック、トレーラーに発生する振動の加速度は、段差等の通過を考慮しても \square G 未満であることから、増幅を保守的に \square %考慮しても輸送容器に負荷される荷重は輸送物の \square 倍未満である。

一般の試験条件における積み重ね評価 ((ロ)-A.5.4) において自重の 5 倍荷重がかかった評価においても輸送容器に変形は生じないことを考慮しても、輸送中に発生する振動によって輸送容器に破損、亀裂が生じるおそれはない。



図(ロ)A-10 力による強制振動の共振曲線

実用 機械振動学, 國枝正春著, 1984

通常輸送条件における各部の発生応力と、解析基準値（その部品を構成している材料の許容応力）を比較し、安全率を算出した結果を表(□)A-10中の「通常輸送時」に示す。

いずれの解析結果も安全率は1を上回っており、解析基準を満足している。

A.5 一般の試験条件

A.5.1 熱的試験

「(ロ)-B.4 一般の試験条件」で太陽輻射熱による温度上昇を考慮して熱的試験の評価を行った結果から輸送物の最高温度は□°Cを考慮する。

A.5.1.1 温度及び圧力の要約

圧力及び温度は、(ロ)-B.4.4 最大内圧の評価より、太陽輻射熱による最高温度(□°C)と温度上昇による最高圧力(輸送容器内外圧差 □ MPa : 燃料棒内外圧差 □ MPa)を用いて応力解析を行った。

A.5.1.2 熱膨張

輸送容器の温度上昇は小さく、また構造材が金属のため熱伝導が良いので、輸送容器各部の温度差は小さい。

異種材料による熱膨張差については、輸送容器と収納物については、ストロングバックの上部ゲート、及び下部ゲートの内側に取付けた緩衝材(シリコンゴム)によって熱膨張差が吸収されるため、応力は発生しない。

以上のことから、熱膨張による顕著な応力は発生せず、亀裂・破損の生じるおそれはない。

A.5.1.3 応力計算

(1) 最大内圧によりケースに発生する応力

(1)-1 ケース胴部

内圧により円筒部分に発生する最大応力は次式で示す円周方向引張応力である。

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr}{t}$$

ここで

σ_{θ} 円周方向引張応力 MPa

P 最大内圧 □ MPa (「B.4.4 最大圧力」において太陽輻射を考慮して得られた輸送容器最大内外圧差)

r 容器最大内径 □ mm

t 容器円筒部肉厚 □ mm

これらを用いると

$$\sigma_{\theta} = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{MPa}$$

輸送容器外側ケースの材質は SUS304 であり、許容引張応力は表(ロ)A- 3 より 183 MPa である。従って、輸送容器外側ケースに発生する応力は基準値より小さく安全である。

(1)-2 ケース胴溶接部

内圧によりケース胴溶接部に発生する最大応力は、両側すみ肉溶接部ののど厚部に生じ、次式で求まる。

$$\sigma_w = \frac{Pr}{2tw}$$

ここで

σ_w のど厚部に生じる引張応力 MPa

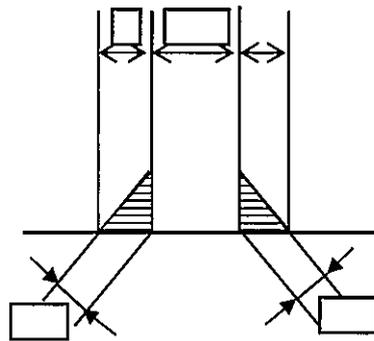
P 最大内外圧差 MPa (「B.4.4 最大圧力」において太陽輻射を考慮して得られた輸送容器最大内外圧差)

r 容器最大内径 mm

tw のど厚 mm

これらを用いると

$$\sigma_w = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{ MPa}$$



溶接部の許容引張応力は表(ロ)A-3より 111 MPa である。従ってケース胴溶接部に発生する応力は基準値より小さく安全である。

(2) 最大内圧によりドーム板に発生する応力

(2)-1 ドーム板

輸送容器側面のドーム板にかかる応力を求める。ドーム板はリブによって補強されている。中央部のリブと周辺部とで支持される部分に圧力のかかった場合の最大応力は次式で求まる。

$$\sigma_r = 0.4012 \times \frac{Pb^2}{t^2}$$

ここで

σ_r ドーム板にかかる応力 MPa

P 最大内外圧差 MPa

b リブ間隔 mm

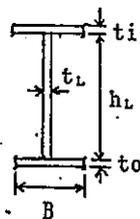
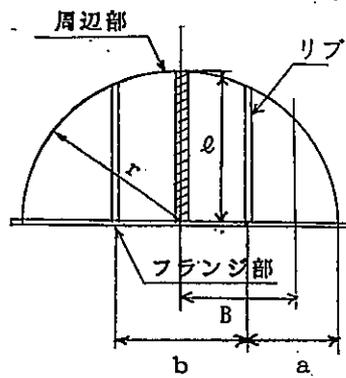
t ドーム板肉厚 mm

これらを用いると

$$\sigma_r = 0.4012 \times \frac{\text{}}{\text{}} = \text{} \text{ MPa}$$

ドーム板の材質は SUS304 であり、許容引張応力は表(ロ)A-3より 183 MPa である。従ってドーム板に発生する応力は基準値より小さく安全である。

(2)-2 ドーム板補強リブの曲げ応力



ドーム板を補強するリブの曲げ応力は

$$\sigma_L = \frac{Wl^2}{8Z}$$

ここで

σ_L リブの曲げ応力 MPa

W 単位長さ当りの面圧荷重

$$W = BP = \text{} \text{ N/mm}$$

$$B = \frac{1}{2}(a + b) = \text{} \text{ mm}$$

a リブと周辺部の間隔 mm

b リブ間隔 mm

P 最大内外圧差 MPa

l リブの長さ mm

Z リブの断面係数 mm^3

リブの断面積は両端が mm と mm の平板と溶接されているため、断面係数は次のようになる。

$$Z = \frac{I}{(h \cdot \eta)}$$

$$I = \frac{1}{12} \{ Bh^3 - (B - t_L)h_L^3 \} + Bt_o \left(\frac{t_o}{2} - \eta \right)^2 + t_L h_L \left(t_o + \frac{h_L}{2} - \eta \right)^2 + Bt_i \left(h - \frac{t_i}{2} - \eta \right)^2$$

$$= \boxed{}$$

$$h = t_o + h_L + t_i = \boxed{} \text{ mm}$$

$$t_o \text{ 外壁厚さ } \boxed{} \text{ mm}$$

$$h_L \text{ リブ高さ } \boxed{} \text{ mm}$$

$$t_i \text{ 内壁厚さ } \boxed{} \text{ mm}$$

$$t_L \text{ リブ厚さ } \boxed{} \text{ mm}$$

$$\eta \text{ 重心高さ } \text{ mm}$$

$$\eta = \frac{Bh^2/2 - (B - t_L)(t_o + h_L/2)h_L}{Bh - (B - t_L)h_L}$$

$$= \boxed{} \text{ mm}$$

これらを用いると

$$Z = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ mm}^3$$

よってリブの曲げ応力は

$$\sigma_L = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = \boxed{} \text{ MPa}$$

リブの材質は SUS304 であり、許容応力は表(ロ)A-3 より 183 MPa である。従って

ドーム板に発生する応力は基準値より小さく安全である。

(3) 最大内圧によりロッドボルトに発生する応力

ロッドボルトに内圧がかかった状態で吊上げた場合の解析を「A.4.4.5 吊上げ時、ロッドボルトに発生する応力」にて行った。この結果よりロッドボルトに発生する応力は基準値より小さく安全である。

(4) 最大内圧により、燃料棒に発生する応力

被覆管の材質は、ジルカローイ-4 及びジルコニウム合金であり、それについて発生する応力を評価した。放射性物質を収納している燃料棒被覆管にかかる応力を次式で計算する。なお、17×17 型タイプ 64 に対する評価は被覆管肉厚の薄い 17×17 型タイプ 57 の結果に包絡されることから評価を省略する。

ここで、

σ_{θ} 被覆管にかかる円周方向応力 MPa

P 最大内外圧差 MPa (「B.4.4 最大圧力」において太陽輻射を考慮して得られた被覆管最大内外圧差)

r 被覆管内半径 $\left\{ \begin{array}{l} 4.70 \text{ mm} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型}) \\ 4.18 \text{ mm} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57) \end{array} \right.$

t 被覆管肉厚 $\left\{ \begin{array}{l} 0.66 \text{ mm} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型}) \\ 0.57 \text{ mm} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57) \end{array} \right.$

これらを用いると

$\sigma_{\theta} = \text{MPa}$ (14×14 型, 15×15 型), MPa (17×17 型タイプ 57)

燃料棒の材質は、ジルカローイ-4 及びジルコニウム合金であり、引張応力が働いているので、基準値は、表(ロ)A-3 より MPa である。

したがって、燃料棒に発生する応力は、基準値より小さく安全である。

(5) 最大内圧による燃料棒端部の溶接部に発生する応力

この場合も、燃料棒の材質についてそれぞれに発生する応力を評価した。燃料棒端部の溶接部にかかる軸方向応力を、次式で計算する。

$$\sigma = \frac{\pi d_i^2 \cdot P / 4}{\pi (d_o^2 - d_i^2) / 4} = \frac{d_i^2 \cdot P}{d_o^2 - d_i^2}$$

ここで

P 最大内圧 MPa

d_o 燃料棒外径 $\left\{ \begin{array}{l} 10.72 \text{ mm} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型}) \\ 9.50 \text{ mm} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57) \end{array} \right.$

d_i 燃料棒内径 $\left\{ \begin{array}{l} 9.40 \text{ mm} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型}) \\ 8.36 \text{ mm} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57) \end{array} \right.$

これらを用いると

$$\sigma = \square \text{MPa}(14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型}), \square \text{MPa}(17 \times 17 \text{ 型タイプ 57})$$

溶接部には、引張応力が働いているため、基準値は、表(ロ)A- 3 より \square MPa である。

したがって、燃料棒に発生する応力は、基準値より小さく安全である。

A.5.1.4 許容応力との比較

許容応力と解析値の比較を表(ロ)A- 10 に示す。いずれの解析結果も解析基準値を満足しており安全である。

A.5.1.5 繰り返し応力の評価

A.5.1.3(1),(2)にて輸送容器に及ぼす応力を評価した結果、0℃から70℃までの温度上昇による内外圧差から生じた応力は最大 MPa であった。保守的に温度低下 (0℃から40℃) によって生じる応力も MPa であると考え、応力振幅は MPa となる。本輸送容器の使用予定期間は80年であり、使用期間を通しての輸送予定回数は計400回である。使用予定より保守的な条件として80年間毎日1日1回の輸送を想定すると、 $80 \times 365 = 29,200$ 回発生する。しかしながら、図(ロ)A-8のステンレス鋼の疲労曲線によると、少なくとも200 MPa以下の応力振幅では室温から400℃の環境下において 10^7 回以上繰り返し応力が発生しても疲労破壊が生じることはない。

A.5.1.3(3)にてクロムモリブデン鋼製のロッドボルトに及ぼす応力を評価した結果、ロッドボルトに内圧がかかった状態で吊上げた場合に発生する応力は最大 MPa であり、ステンレス鋼と同様に保守的に考えて応力振幅は MPa となる。ステンレス鋼と同様に応力が29,200回発生すると考慮する。図(ロ)A-9のクロムモリブデン鋼の疲労曲線によると、少なくとも206 MPa (3.0×10^4 psi) 以下の応力振幅では室温から371℃ (700° F) の環境下において 10^6 回以上繰り返し応力が発生しても疲労破壊が生じることはない。

A.5.2 水噴霧

告示別記第三第一号イの水の吹き付け試験に代わり、次に述べる試験を実施して評価した。
輸送容器内に約 1.22×10^5 Pa の圧力の不活性ガスを加え少なくとも 1 時間保持し、所定以上の漏えいのないことを確認している。

本輸送容器は以上の試験に合格した密閉容器であるため、水噴霧によって容器内へ水が侵入することはない。

A.5.3 自由落下

本輸送物は、円筒形輸送容器を使用しており、総重量が 5,000 kg 以下であるので、告示別記第三第一号ロ(1)に基づき、落下の高さは 1.2 m として、計算により評価する。

(a) 解析モデル

ここでは、本輸送物の形状を考慮して自由落下時の収納物に加わる加速度、自由落下時の輸送物の容積減少を計算にて算出し、自由落下した際の輸送物に対する影響について評価する。

A.5.3.1 各姿勢での 1.2 m 自由落下

ショックマウントが防振構造物の落下エネルギーを吸収するとしたときの、収納物に加わる加速度を次式で求める。

$$\alpha = \sqrt{\frac{Kh}{WG}} G$$

ここで

α 収納物に加わる加速度 m/s^2

K ショックマウントのバネ剛性で図(ロ)A-2 より

1 個当り $\square \text{N/mm}$ となる。18 個に対しては

$$K = 18 \times \square = \square \text{N/mm}$$

h 落下高さ 1200 mm

W 防振構造物重量 $\square \text{kg}$

G 重力加速度 9.80665 m/s^2

これらを用いると

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{\square}{\square}} \times 9.80665 \\ &= \square \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

重力加速度の比で表すと

$$\alpha = \square G$$

これは「A.9.2.1 強度試験・落下試験 I (9 m 落下時)」で述べられる落下試験の際に計測された加速度よりも小さく、従って収納物に影響を与えない。

A.5.3.2 垂直落下

垂直落下の際、収納物や防振構造物などの内容物は底面に取付けた緩衝材によって衝撃が吸収されるので、外筒の変形に寄与するのは輸送容器ケースの重量である。輸送容器ケースが軸方向に一様断面で、落下時に一様の加速度を受けるとすると図(口)A-11に示す円筒の上端から距離 x の位置での軸方向応力は次式となる。

$$\sigma_x = \alpha x \rho$$

ここで

σ_x 軸方向応力

x 上端からの距離

ρ 容器の比重量

上式より応力は距離に比例することがわかる。軸方向応力が降伏応力に等しくなる位置を L_1 とすると、上式は降伏応力 σ_Y を用いて次のように書くことができる。

$$\sigma_x = \sigma_Y \times x / L_1$$

ここで

σ_Y 降伏応力

L_1 上端から軸方向応力が降伏応力になる位置までの距離

一方、応力とひずみの関係式は前節と同様次式のような多項式で表示される（文献(2)）。

$$\sigma = \sigma_0 + A \varepsilon^n$$

ここで

σ 真応力

σ_0 定数 174 MPa

A 定数 985 MPa

ε 真ひずみ

n 定数 0.53

上式で求めた応力・ひずみ曲線を図(口)A-12に示す。以降の計算を容易にするため、上式の応力・ひずみ曲線を2直線近似で表現する。

$$\sigma = \sigma_Y + H \varepsilon$$

ここで

σ_Y 2直線近似の降伏応力

H 加工硬化係数

図(□)A-13より

$$\sigma_Y = 201 \text{ MPa}$$

$$H = 4776 \text{ MPa}$$

となることがわかる。

多項式は大きな塑性ひずみ域を含めるため、弾性ひずみ域を省略しているが、ここでは次式のように考慮する。

$$\begin{aligned}\sigma &= E \varepsilon_Y + (\varepsilon - \varepsilon_Y)H \\ &= (E-H) \varepsilon_Y + \varepsilon H\end{aligned}$$

ただし $\varepsilon > \varepsilon_Y$

ここで

E 縦弾性係数

$$\varepsilon_Y = \sigma_Y / E$$

弾性領域 ($0 < x < L_1$) での単位体積当りのひずみエネルギーは

$$dE_1 = \int \sigma d\varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{1}{2E} \left(\frac{\sigma_Y}{L_1} \right)^2 X^2$$

塑性領域 ($L_1 < x < L_2$) での単位体積当りの全ひずみエネルギーは

$$dE_2 = \int \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2}(\sigma + \sigma_Y)\varepsilon - \frac{1}{2}\sigma_Y \varepsilon_Y$$

ここで

$$\varepsilon = (\sigma - \sigma_Y + H\varepsilon_Y) / H = \left(\frac{\sigma_Y}{L_1} X - \sigma_Y + H\varepsilon_Y \right) / H$$

を代入すると次式となる。

$$dE_2 = \frac{\sigma_Y^2}{2H} \left(\frac{X^2}{L_1^2} + \frac{H}{E} - 1 \right)$$

よって容器の全ひずみエネルギー E_V は次式となる。

$$\begin{aligned}E_V &= A \int dE_1 + A \int dE_2 \\ &= \frac{\sigma_Y^2 A}{2E} \int_0^{L_1} \frac{x^2}{L_1^2} dx + \frac{\sigma_Y^2 A}{2H} \int_{L_1}^{L_2} \left(\frac{x^2}{L_1^2} + \frac{H}{E} - 1 \right) dx \\ &= \frac{\sigma_Y^2 A}{6EL_1^2} \{ 3L_1^2 L_2 - 2L_1^3 + \frac{E}{H} (L_2^3 - 3L_1^2 L_2 + 2L_1^3) \}\end{aligned}$$

ここで

A 円筒の断面積

このときの塑性変形量は次式となる。

$$\delta V = \int_{L_1}^{L_2} \left(\varepsilon - \frac{\sigma}{E} \right) dx$$

円筒の位置エネルギーと上式の全ひずみエネルギーが等しくなるように L_1 を求める。

$$= \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{E} \right) \frac{\sigma_Y}{2L_1} (L_2 - L_1)^2$$

落下高さ 1.2 m のときの位置エネルギーは

$$E_{PV} = W_C G H$$

ここで

E_{PV}	位置エネルギー	N·mm
W_C	輸送容器ケース重量	<input type="text"/> kg
H	落下高さ	1200 mm
G	重力加速度	9.80665 m/s ²

従って

$$E_{PV} = \text{} \text{ N}\cdot\text{mm}$$

よって

$$E_V = E_{PV}$$

となる L_1 を求める。このときに用いる数値は

$$\sigma_Y = 201 \text{ MPa}$$

$$A = \text{} \text{ mm}^2$$

$$E = 191000 \text{ MPa}$$

$$L_2 (\text{容器長さ}) = \text{} \text{ mm}$$

$$H = 4776 \text{ MPa}$$

従って

$$L_1 = \text{} \text{ mm}$$

このときの塑性変形量は

$$\delta v = \text{} \text{ mm}$$

となる。これによる容積減少量は

$$V_v = \pi R_0^2 \delta v$$

$$= \pi \times \text{}$$

$$= \text{} \text{ mm}^3$$

従って、本垂直落下を行った場合の容積減少は、容器の全体積 mm³ に対して % の減少割合となる。

A.5.3.3 水平落下

水平落下の際、外筒は内筒と一体になった変形挙動をする。容器断面について考えると、図(ロ)A-13に示すように外筒と内筒の間に不等間隔で□mm厚さのリブが入っており、外筒と内筒の距離を保つ役割をしている。

この断面に曲げモーメント M が作用したときのひずみエネルギーを求め、落下高さに相当する位置エネルギーと等しくなるような変形領域を計算する。

断面での釣合条件は

$$\int \sigma dy = 0$$

$$dM = \int \sigma (y - \eta) dy$$

ここで

σ 周方向応力

y 外筒外表面からの距離

η 断面の中立軸と外筒外表面の距離

dM 容器の軸方向単位長さ当りの曲げモーメント

リブに作用する力と曲げ剛性は全体のものに比べ小さいので無視し、かつ内、外筒の板厚が薄いため、板厚内の応力は一様とみなすと、上式の釣合は次のように書き表せる。

$$\sigma_1 t_1 = \sigma_2 t_2$$

$$dM = \sigma_1 t_1 \eta + \sigma_2 t_2 (h - \eta)$$

ここで

σ_1 外筒の応力

σ_2 内筒の応力

t_1 外筒の板厚

t_2 内筒の板厚

η 外筒中心から断面の中立軸までの距離

h 外筒中心と内筒中心の距離

断面内の周方向ひずみは中立軸からの距離に比例するため外筒、内筒それぞれでは

$$\varepsilon_1 = \frac{\eta}{\rho}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{h - \eta}{\rho}$$

ここで

ε_1 外筒の周方向ひずみで圧縮側を正にとる。

ε_2 内筒の周方向ひずみ

$$\rho = \square - \eta \quad \text{曲率半径}$$

一方、外筒、内筒とも降伏しているとする、応力ひずみの関係は 2 直線近似で垂直落下の場合と同様に次式で表わされる。

$$\sigma = (E - H) \frac{\sigma_y}{E} + \varepsilon H$$

これらの関係を用いると力の釣合より、中立軸の距離 η は

$$\eta = \frac{(E - H)(t_2 - t_1) \frac{\sigma_y}{E} + \frac{H}{\rho} h t_2}{\frac{H}{\rho} (t_2 + t_1)}$$

単位幅当りの曲げモーメント dM は

$$dM = (E - H) \frac{\sigma_y}{E} \{t_1 \eta + t_2 (h - \eta)\} + \frac{H}{\rho} \{t_1 \eta^2 + t_2 (h - \eta)^2\}$$

全ひずみエネルギーは、曲げモーメントが周方向に一様とすると

$$E_H = \int_0^{\theta_0} 2B dM d\theta$$

$$= 2B\theta_0 \left[(E - H) \frac{\sigma_y}{E} \{t_1 \eta + t_2 (h - \eta)\} + \frac{H}{\rho} \{t_1 \eta^2 + t_2 (h - \eta)^2\} \right]$$

ここで

E_H 水平落下時の全ひずみエネルギー

B 容器長さ

θ_0 変形する領域の角度の半分

このときの変形量 δ_H は

$$\delta_H = R_0 (1 - \cos \theta_0)$$

ここで

δ_H 水平落下時の変形量

R 外筒外表面の半径

輸送容器の位置エネルギーは

$$E_{pH} = WGH$$

ここで

E_{pH} 位置エネルギー $N \cdot mm$

W 輸送容器の全重量 \square kg

H 落下高さ 1200 mm

G 重力加速度 9.80665 m/s²

従って

$$E_{pH} = \boxed{} \text{ N}\cdot\text{mm}$$

位置エネルギーとひずみエネルギーが等しくなる θ_0 を以下の数値を用いて求める。

$$B = \boxed{} \text{ mm}$$

$$E = 191000 \text{ MPa}$$

$$H = 4776 \text{ MPa}$$

$$\sigma_Y = 201 \text{ MPa}$$

$$h = \boxed{} \text{ mm}$$

$$t_1 = \boxed{} \text{ mm}$$

$$t_2 = \boxed{} \text{ mm}$$

$$R_0 = \boxed{} \text{ mm}$$

まず中立軸の距離 η を求める

$$\rho = \boxed{}$$

$$\eta = \boxed{}$$

よって変形する領域の角度の半分 θ_0 は

$$\theta_0 = \boxed{} \text{ rad}$$

変形量 δ_H は

$$\delta_H = \boxed{} \text{ mm}$$

となる。これによる容積減少量は

$$V_H = \frac{1}{2} R_0^2 (2\theta_0 - \sin 2\theta_0) \cdot L_2$$

$$= \frac{1}{2} \times \boxed{} \{ 2 \times \boxed{} - \sin(2 \times \boxed{}) \} \times \boxed{}$$

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

従って、本水平落下を行った場合の容積減少は、容器の全体積 $\boxed{} \text{ mm}^3$ に対して $\boxed{}\%$ の減少割合となる。

A.5.3.4 コーナー落下

コーナー落下試験では底板と側板の変形によってエネルギーが吸収される。図(ロ)A- 14 に示すように鉛直との傾斜角が θ のときのひずみエネルギーを底板と側板について求める。

(i) 底板による吸収エネルギー

図(ロ)A- 14 のように元の形状が接地面に投影された形で変形すると仮定する。このときの変形部のひずみは、

$$\varepsilon_B = \frac{l_0 - l}{l_0}$$

ここで

ε_B 底板の角度 θ でのひずみ

l_0 底板の角度 θ での変形前の長さ

l 底板の角度 θ での変形後の長さ

l は傾斜角 θ により次式のように表わせる

$$l = l_0 \cos \theta$$

よって、ひずみは

$$\varepsilon_B = 1 - \cos \theta$$

これは底板の接地位置に無関係に成立している。したがって、底板のひずみエネルギーはこのひずみ ε_B による単位体積当りのひずみエネルギーに、接地面の体積（接地面の面積 \times 板厚）を乗じればよいことになる。

接地面の変形前の面積 A_B は

$$A_B = \frac{1}{2} R^2 (2\theta_0 - \sin 2\theta_0)$$

ここで

A_B 接地面の面積

R 底板の半径

θ_0 接地部の角度の半分 (図(ロ)A- 14)

よって底板による吸収エネルギー E_B は次式となる。

$$E_B = A_B \cdot t_B \cdot d\varepsilon_B$$

$$= \frac{1}{2} t_B R^2 (2\theta_0 - \sin 2\theta_0) dE_B$$

ここで

t_B 底板板厚

dE_B 底板の単位体積当りひずみエネルギー

(ii) 側板による吸収エネルギー

図(口)A-14において底板中心軸からの角度 α の位置にあった底板と側板の接合部D点が、落下後にD'に変形した場合を考える。変形前の点Cと点Dの距離 h_0 は次式で表わされる。

$$h_0 = l_1 \tan \Theta$$

$$= R(\cos \alpha - \cos \theta_0) \tan \Theta$$

変形後の点Cと点D'の距離 h は次式となる。

$$h = h_0 \sin \Theta$$

よってこのときのひずみは次式となる。

$$\epsilon_s = \frac{h_0 - h}{h_0} = (1 - \sin \Theta)$$

底板の場合と同様に側板のひずみは接地位置に無関係に傾斜角度にのみ依存していることがわかる。従って側板のひずみエネルギーはこのひずみ ϵ_s による単位体積当りのひずみエネルギーに、接地部の体積を乗じればよいことになる。

側板のうち接地する部分の面積は、

$$A_s = \frac{2Rhs}{b} \{(b - R)\theta_0 + a\}$$

ここで

A_s 側板のうち接地する部分の面積

hs 接地部の高さ (図(口)A-14)

b 接地部の長さ (")

θ_0 接地部の角度の半分 (")

a 接地部の弦長さの半分 (")

b , hs , a は半径 R と角度 θ_0 によって次式のように表わせる。

$$b = R (1 - \cos \theta_0)$$

$$hs = R (1 - \cos \theta_0) \tan \Theta$$

$$a = R \sin \theta_0$$

よって

$$A_s = 2R^2 \tan \Theta (\sin \theta_0 - \theta_0 \cos \theta_0)$$

側板による吸収エネルギー E_s は次式となる。

$$E_s = A_s \cdot t \cdot dE_s$$

$$= 2t R^2 \tan \Theta (\sin \theta_0 - \theta_0 \cos \theta_0) dE_s$$

ここで

t 側板板厚

dE_s 側板の単位体積当りひずみエネルギー

(iii) 全吸収エネルギーと変形量

全変形吸収エネルギーを表わす式は

$$E_A = E_B + E_s$$

$$= \frac{1}{2} t B R^2 (2\theta_0 - \sin 2\theta_0) dE_B + 2t R^2 \tan \Theta (\sin \theta_0 - \theta_0 \cos \theta_0) dE_s$$

ここで

E_A 全変形吸収エネルギー $N \cdot mm$

E_B 底板による吸収エネルギー $N \cdot mm$

E_s 側板による吸収エネルギー $N \cdot mm$

t_B 底板の板厚 mm

R_0 外筒の半径 mm

θ_0 接地部の角度の半分

t 側板の板厚 mm

Θ 落下角度

落下角度 Θ は

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{D}{L}$$

ここで D 容器外径 mm

L 容器長さ mm

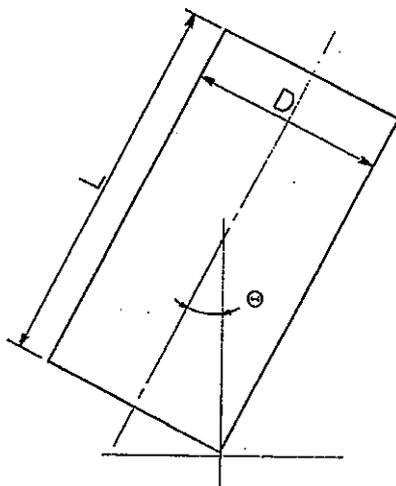
よって

$$\Theta = \text{}^\circ$$

底板及び側板のひずみは

$$\epsilon_B = 1 - \cos \Theta = \text{}$$

$$\epsilon_s = 1 - \sin \Theta = \text{}$$



ひずみエネルギーを求めるための応力とひずみの関係式は次式のような多項式で表示される(文献(2))。

$$\sigma = \sigma_0 + A \varepsilon^n$$

ここで

σ 真応力

σ_0 定数 174 MPa

A 定数 985 MPa

ε 真ひずみ

n 定数 0.53

このため単位体積当りのひずみエネルギーは次式で表わせる。

$$\begin{aligned} dE &= \int_0^\varepsilon (\sigma_0 + A\varepsilon^n) d\varepsilon \\ &= \sigma_0 \varepsilon + \frac{A\varepsilon^{1+n}}{1+n} \end{aligned}$$

従って、底板及び側板の単位体積当りひずみエネルギーは

$$\begin{aligned} dE_B &= 174 \times \boxed{} + \frac{985 \times \boxed{}^{1.53}}{1.53} \\ &= \boxed{} \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dE_S &= 174 \times \boxed{} + \frac{985 \times \boxed{}^{1.53}}{1.53} \\ &= \boxed{} \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3 \end{aligned}$$

dE_B 底板の単位体積当りひずみエネルギー $\boxed{} \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3$

dE_S 側板の単位体積当りひずみエネルギー $\boxed{} \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3$

一方位置エネルギーは

$$E_C = WGH$$

ここで

E_C 1.2 m での位置エネルギー

W 輸送物の全重量 $\boxed{} \text{ kg}$

H 落下高さ 1200 mm

G 重力加速度 9.80665 m/s²

よって

$$E_C = \boxed{} \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$E_A = E_C$ となる θ_0 を求めると

$$\theta_0 = \boxed{} \text{ rad} = \boxed{}$$

このときの側板の変形量 h_s は

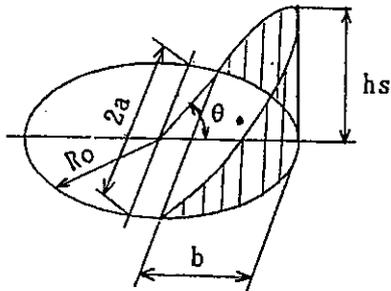
$$\begin{aligned} h_s &= R_0 (1 - \cos \theta_0) \tan \theta_0 \\ &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \text{ mm} \end{aligned}$$

底板の接地部の長さ b は

$$\begin{aligned} b &= R_0 (1 - \cos \theta_0) \\ &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \text{ mm} \end{aligned}$$

変形した体積は次式で与えられる。

$$V_c = \frac{h_s}{3b} \{ a(3R_0^2 - a^2) + 3R_0^2(b - R_0)\theta_0 \}$$



ここで

$$\begin{aligned} h_s &= \boxed{} \text{ mm} \\ b &= \boxed{} \text{ mm} \\ \theta_0 &= \boxed{} \text{ rad} \\ R_0 &= \boxed{} \text{ mm} \\ a &= R_0 \sin \theta_0 = \boxed{} \text{ mm} \end{aligned}$$

よって

$$V_c = \boxed{} \text{ mm}^3$$

従って、本コーナー落下を行った場合の容積減少は、容器の全体積 $\boxed{} \text{ mm}^3$ に対して $\boxed{}\%$ の減少割合となる。

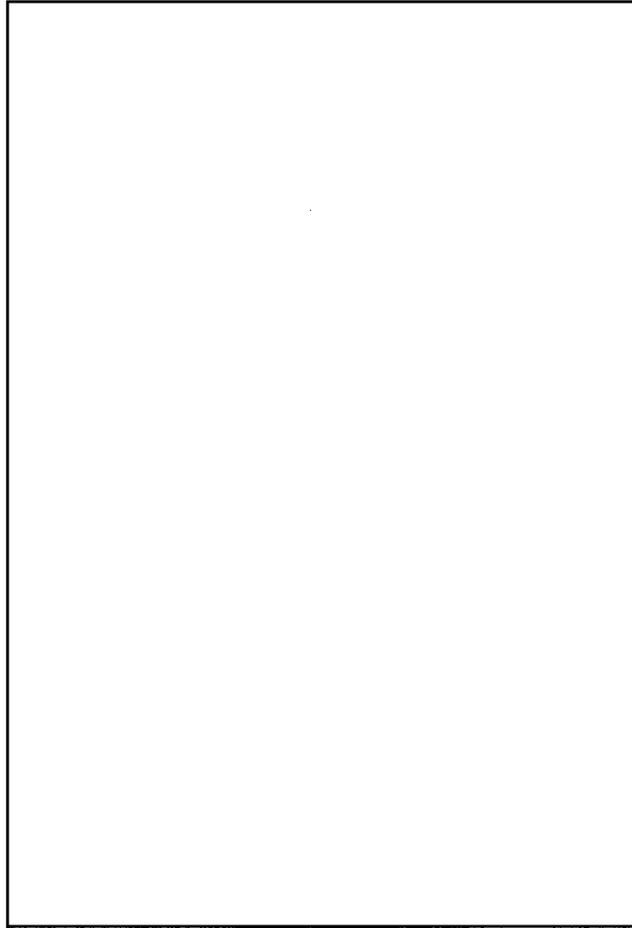
以上をまとめれば、各落下姿勢のうち垂直落下を行った場合が最も全容積減少量が大きくなるが、この場合でも容積減少量は輸送容器体積の $\boxed{}\%$ に相当するにすぎない。

(b) 原型試験

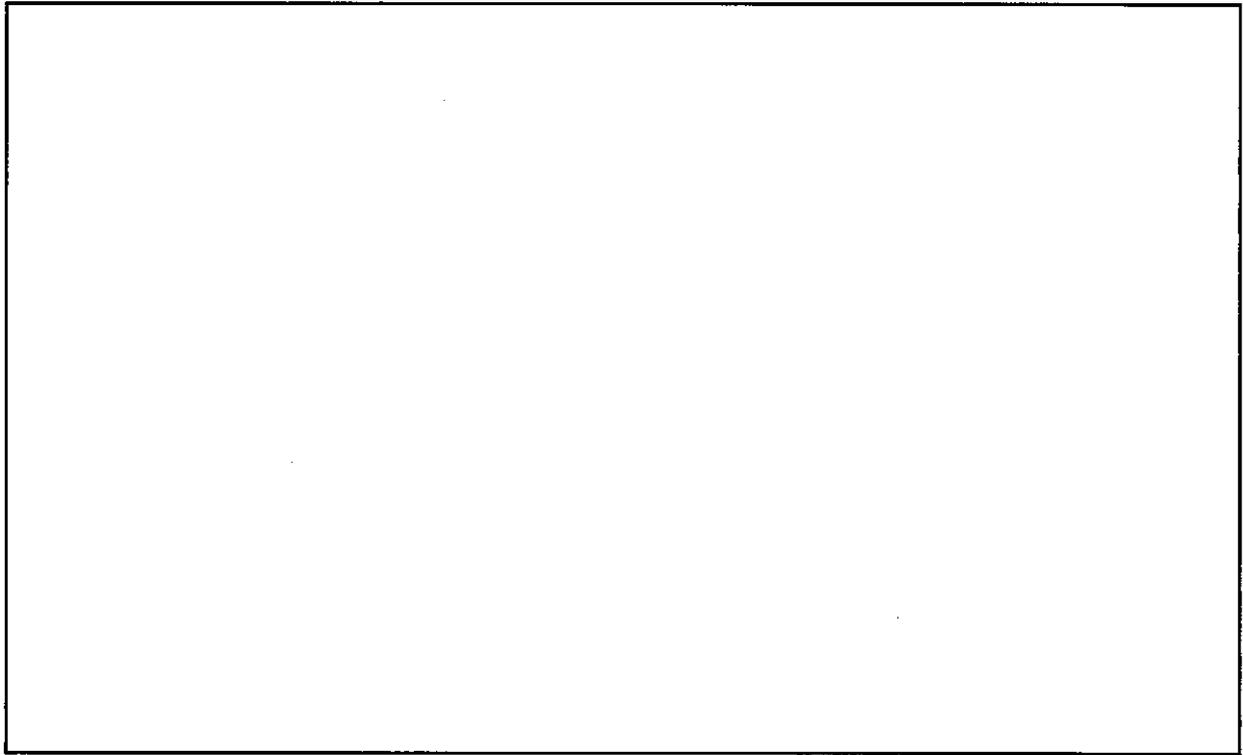
計算により評価しており、原型試験は実施していない。

(c) モデル試験

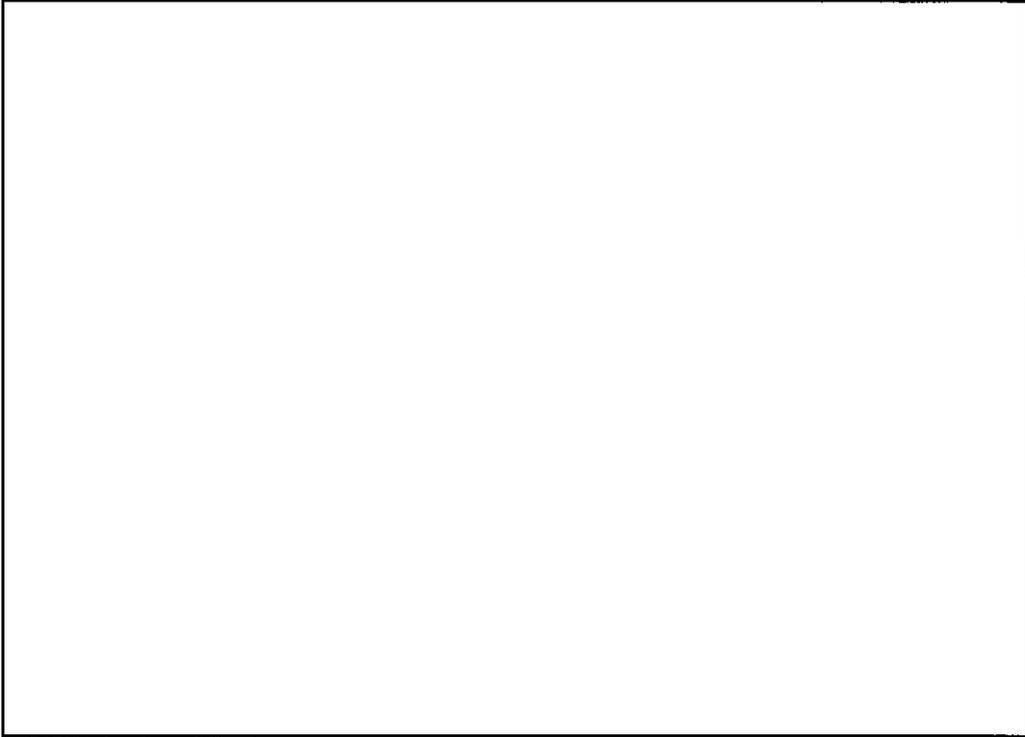
モデル試験は実施していない。



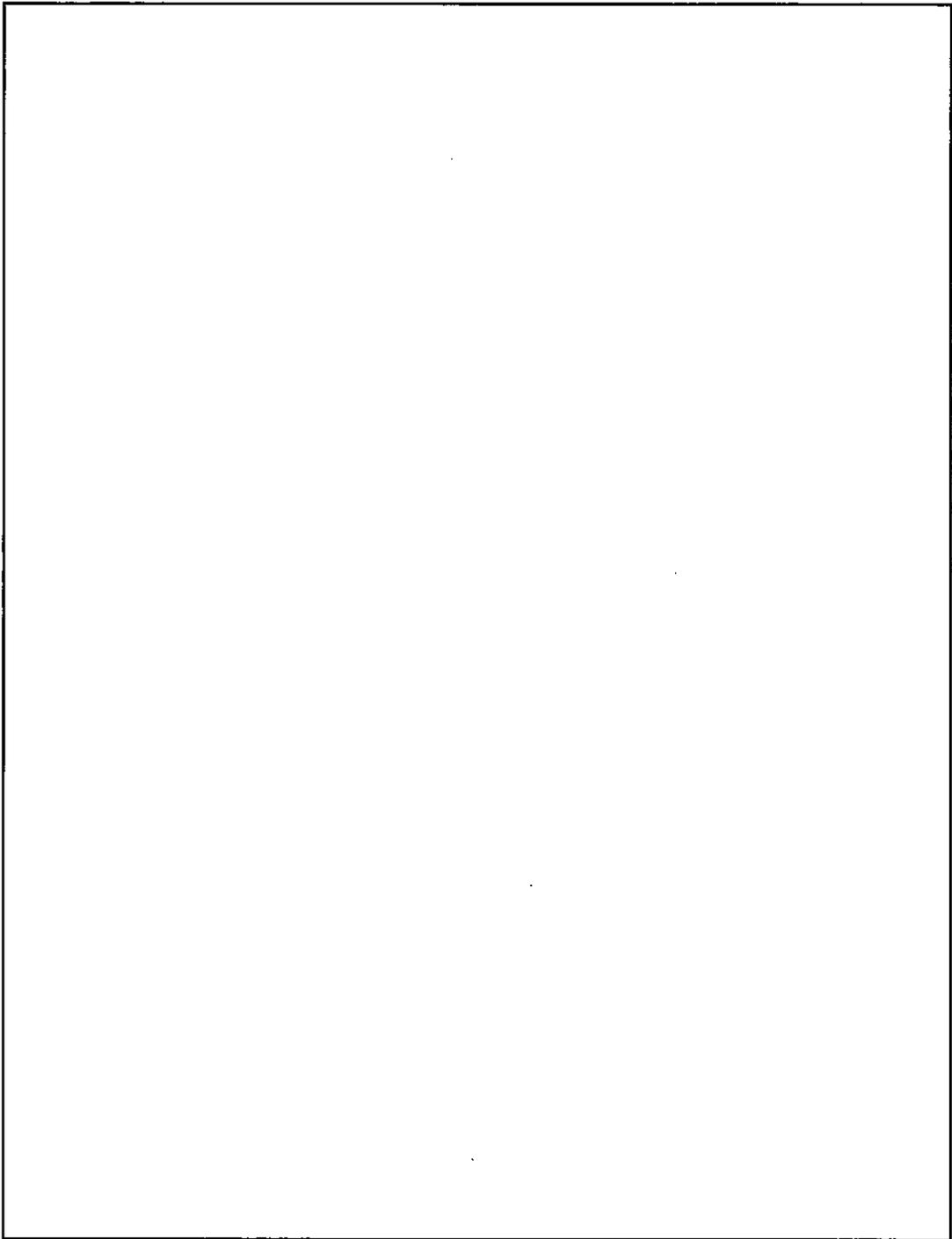
図(ロ)A-11 垂直落下による変形量を求める計算モデル



図(口)A-12 多項式及び2直線近似した応力・ひずみ曲線 (最大ひずみ 0.02)



図(ロ)A-13 水平落下による変形を求める計算モデル



図(ロ)A-14 コーナー落下による変形を求める計算モデル

A.5.4 積み重ね試験

告示別記第三第一号ロ(3)で、要求されている圧縮試験については、計算により解析した。
 輸送物の自重の 5 倍の荷重又は輸送物の鉛直投影面積に 13 kPa を乗じた荷重のいずれか大
 きい方の荷重に等しい圧縮力を供試物の底面及びその対面に均一に加える場合を考える。こ
 こで輸送物の 5 倍の荷重を W_a 、13 kPa×鉛直投影面積の荷重を W_b とすると

$$W_a = \boxed{\quad} \text{ N}$$

$$W_b = 7.31 \times 10^4 \text{ N}$$

$W_a > W_b$ であるので、 $W_a = \boxed{\quad}$ N の荷重を以下の解析で使用する。

この荷重はすべて両端部に取付けられているスタッキングブラケットで支持され、上側ケ
 ース、下側ケースを介して下側ケースのスキッドに伝えられる。

上側ケースと下側ケースはロッドボルトの締付けにより一体とみなせるため、図(ロ)A-15
 のような上下方向から力を受けるリングと考えて応力を求める。

このときのリングに生じる曲げモーメントは文献(3)で与えられ次式で表わされる。

$0 < \theta \leq \alpha$ において

$$M = W_a R \{f(\alpha, \beta, \theta) - \sin \beta + \sin \alpha\}$$

ここで

M 脚角度 θ における曲げモーメント $\text{N} \cdot \text{mm}$

W_a 輸送物の 5 倍の荷重のうち脚 1 個にかかる力 $\boxed{\quad}$ N

R 外筒の半径 $\boxed{\quad}$ mm

$$f(\alpha, \beta, \theta) = 0.3183 \{ \beta \sin \beta + \cos \beta - \alpha \sin \alpha - \cos \alpha - \cos \theta (\sin^2 \alpha - \sin^2 \beta) \}$$

α スキッドによる支持点と鉛直線のなす角 $\boxed{\quad}^\circ$ ($\boxed{\quad}$ rad)

β スタッキングブラケットと鉛直線のなす角 $\pi - \alpha$

θ 荷重を求める点と鉛直線のなす角

$\beta = \pi - \alpha$ より $f(\alpha, \beta, \theta)$ は次式となる。

$$f(\alpha, \beta, \theta) = 0.3183 \{ (\pi - 2\alpha) \sin \alpha - 2 \cos \alpha \}$$

従って曲げモーメント M は次式で与えられることになる。

$$M = -W_a R \times 0.3183 \{ (\pi - 2\alpha) \sin \alpha - 2 \cos \alpha \}$$

$$= \boxed{\quad}$$

$$= \boxed{\quad} \text{ N} \cdot \text{m}$$

この曲げモーメントは $0 < \theta < \alpha$ の間で一様である。この間における曲げ応力は次式で表わされる。

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

ここで

σ_B リングの曲げ応力 MPa

M 曲げモーメント N·mm

Z リングの断面係数 mm³

リングの断面は図(ロ)A-15のA-A断面に示すように2重円筒の間にリブの入った構造になっている。

リングの断面係数は

$$Z = \frac{I}{(h - \eta)}$$

$$I = \frac{1}{12} \{lh^3 - (1 - 2tw)hw^3\} + lh\left(\frac{h}{2} - \eta\right)^2 - (1 - 2tw)hw\left(\frac{h}{2} - \eta\right)^2$$

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

l リブの間隔 mm

h 内筒内面と外筒外面の距離 mm

tw リブの板厚 mm

hw リブの高さ mm

η 重心高さ mm

$$\eta = \frac{lh^2/2 - (1 - 2tw)hw(to + hw/2)}{lh - (1 - 2tw)hw}$$

$$= \text{ mm}$$

to 外筒の板厚 mm

これらを用いると

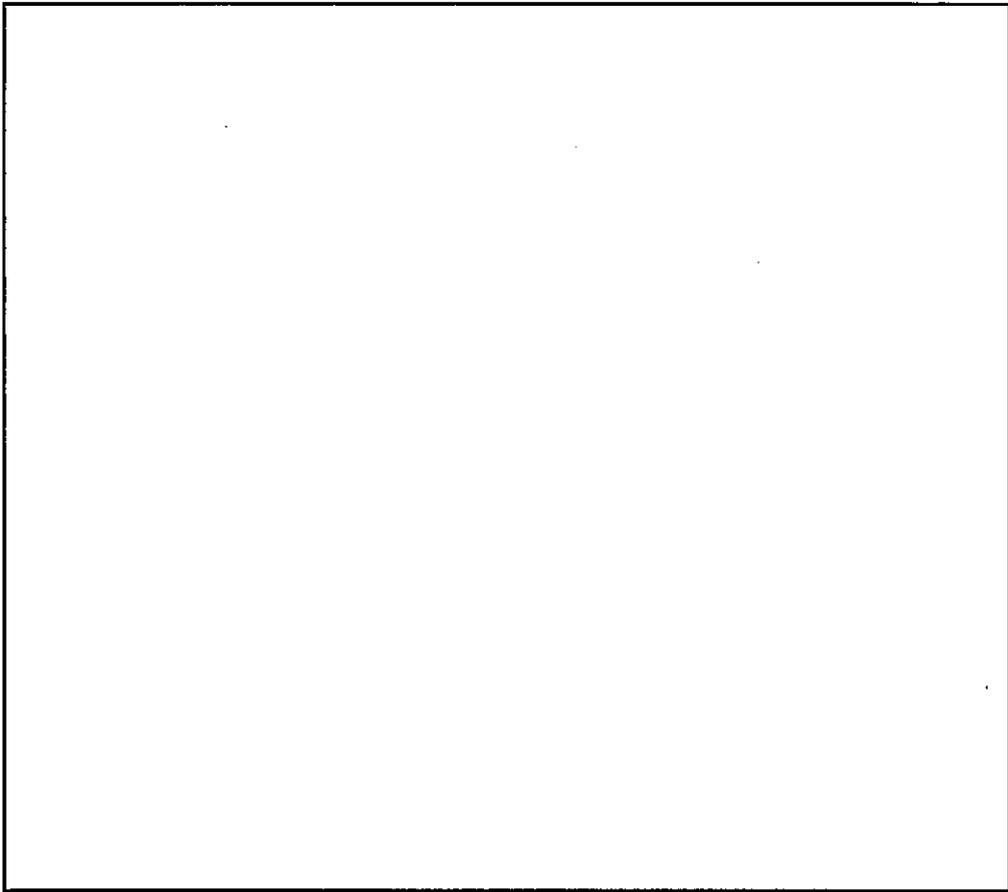
$$Z = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{ mm}^3$$

従って応力は

$$\sigma_B = \frac{\text{}}{\text{}} = \text{ MPa}$$

ケースはSUS304であり、許容応力は表(ロ)A-3より205 MPaである。

従ってケースに発生する応力は基準値より小さく安全である。



図(ロ)A-15 圧縮を受ける上側のケースと下側のケースのリングモデル

A.5.5 貫 通

告示別記第三第一号(ロ)(4)で要求されている貫通試験については、原形容器試験を実施し、貫通がなくほとんど変形していないことから、輸送容器の健全性を保っていることを確認した。

A.5.6 角又は縁落下

告示別記第三第一号(ロ)(2)で要求されている角又は縁落下については、当該輸送物は主要構造材がステンレス鋼製でその重量は最大で kg であるので該当しない。

A.5.7 結果の要約及びその評価

一般の試験条件として、熱的試験、水噴霧、自由落下、積み重ね試験及び貫通試験の各試験条件に対して評価をした結果、容器には局所的な変形が生じるが収納物である燃料集合体及び燃料棒組立体には変形等の影響は見られず、密封境界である燃料棒が破損することはない。

自由落下による変形は 1.2 m からの自由落下試験を実施するものとして解析した。

この結果、各落下姿勢に対する変形量及び体積減少は表(ロ)A-5 に示すとおりで最大でも 0.1% 以下である。

また、自由落下後の輸送物の寸法はコーナー落下による最大変形量 mm が各辺に生じたとしても、容器寸法（幅 mm、高さ mm、長さ mm）に対する変形後の容器寸法は各辺 1000mm 以上である。

表(ロ)A-5 自由落下解析結果

落下姿勢	変形量	体積減少	体積減少率
垂直	軸方向に均一な変形 変形高さ： <input type="text"/> mm	<input type="text"/> mm ³	<input type="text"/> %
水平	胴部に均一な変形 変形高さ： <input type="text"/> mm	<input type="text"/> mm ³	<input type="text"/> %
コーナー	変形高さ： <input type="text"/> mm	<input type="text"/> mm ³	<input type="text"/> %

A.6 特別の試験条件

本輸送物は核燃料物質の収納量が A_2 値以下となる A 型輸送物であるため、B 型輸送物としての特別の試験条件は該当しない。核分裂性物質(ウラン 235)を 15 グラム以上収納するため、核分裂性輸送物として要求される特別の試験条件に該当するが、これについては「A.9.2 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件」で述べる。

A.7 強化浸漬試験

本輸送物は核燃料物質の収納量が A_2 値以下となる A 型輸送物であり、 A_2 値の十万倍を越える量の放射能を収納しないため該当しない。

A.8 放射性収納物

A.8.1 収納物の仕様

放射性物質は両端を密封したジルカロイ-4 又はジルコニウム合金製の被覆管に収納されている。

(1) 主要な核種及び放射能の量

i) 主要な核種 . . . ^{232}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{99}Tc

ii) 放射能の量 . . . Bq 以下

(2) 装荷制限

i) 最大濃縮度

%

ii) 最大収納量

本輸送容器の収納物である新燃料集合体及び燃料棒組立体の収納制限量は 2 体で

kg-UO₂ 以下である。

iii) 物理的性状

本輸送物の収納物の物理的性状は「(イ)-D 輸送容器の収納物」に示したように、焼結研磨された二酸化ウラン焼結体 (UO₂ 焼結体) 又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体をジルカロイ-4 製又はジルコニウム合金製被覆管に装入し、両端を溶接して密封した燃料棒を正方格子配列に組立てた燃料集合体並びに専用バスケット内に正方格子配列で収納した燃料棒組立体である。

iv) 濃縮ウランの種類

濃縮ウラン (再生濃縮ウランを除く : ASTM C996-04 ECGU に準拠)

$$^{232}\text{U} \leq 0.0001 \mu\text{g/gU}$$

$$^{234}\text{U} \leq 10 \times 10^8 \mu\text{g/g}^{235}\text{U}$$

$$^{236}\text{U} \leq 250 \mu\text{g/gU}$$

$$^{99}\text{Tc} \leq 0.01 \mu\text{g/gU}$$

ただし、 $^{236}\text{U} < 125 \mu\text{g/gU}$ の場合は、 ^{232}U 及び ^{99}Tc は適用外

A.8.2 一般の試験条件における放射性収納物の挙動

一般の試験条件として、熱的試験、水噴霧、自由落下、積み重ね試験及び貫通試験の各試験条件に対して評価をした結果、容器には局所的な変形が生じるが収納物には変形等の影響は見られず、放射性収納物である燃料棒の密封境界が破損することはない。

A.8.3 特別の試験条件における放射性収納物の挙動

特別の試験条件下として、一般の試験条件に続いて、9m 落下試験、1m 鋼棒上落下試験、耐火試験の各試験条件においた状態で、放射性収納物である燃料棒の密封境界は損われず、放射性物質の損失又は散逸はない。

A.9 核分裂性輸送物

本輸送物は核分裂性物質（ウラン 235）を 15 グラム以上収納して輸送するため、核分裂性輸送物として、輸送中において臨界に達しないものであるほか、以下に記述するように規則第十一条に規定される技術基準に適合しているものである。

告示の別記第十一の核分裂性輸送物に係る一般の試験条件に引き続き、告示の別記第十二の核分裂輸送物に係る特別の試験条件の試験手順のうち、15 m 浸漬を含む試験よりも臨界評価に最も大きな影響を及ぼすと考えられる強度試験並びに耐火試験下において評価を実施した。

A.9.1 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件

告示の別記第十一に示す核分裂性輸送物に係る一般条件の下において、以下に記述する要件に適合している。

A.9.1.1 水噴霧

「A.5.2 水噴霧」に示す通り、本輸送物には材料劣化はない。臨界解析においては孤立系、配列系に関係なく、すべての評価体系において保守的に輸送容器の浸水を考慮しているが、密封境界である燃料棒内への浸水は考慮していない。

A.9.1.2 自由落下

「A.5.3 自由落下」に示すように、自由落下では、輸送容器に局所的な変形を及ぼすが燃料棒の密封性は維持される。また、輸送容器の局所変形は臨界評価において影響を及ぼさない。

A.9.1.3 積み重ね試験

「A.5.4 積み重ね試験」に示すように、積み重ねによって、輸送容器に有意な変化は認められず、燃料棒の密封性は維持される。よって、積み重ね試験においては構造部に損傷は見られず臨界解析に影響を及ぼすような変形はない。

A.9.1.4 貫通試験

「A.5.5 貫通」に示すように、6kg 丸棒自由落下では、輸送容器の外板を貫通せず、1 辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じないことが確認された。よって、貫通試験においては構造部に損傷は見られず臨界解析に影響を及ぼすような変形はない。

A.9.1.5 結果

以上の結果より、核分裂性輸送物に関わる一般の試験条件下における本輸送物の状態と臨界解析への影響を表(ロ)A-6に示す。一般の試験条件下では、輸送物構造部に1 辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じないこと及び輸送容器に外接する直方体の各辺の長さは 10cm 以上であることが確かめられた。また、臨界解析条件としては、輸送容器内への浸水を考慮する。

表(ロ)A-6 一般の試験条件下の輸送物の損傷状態

試験条件	輸送物の損傷状態	臨界解析への影響
水噴霧	損傷なし	輸送容器内への浸水を考慮 (燃料棒内への浸水は考慮せず)
1.2 m 落下	局所的な変形	影響なし
積み重ね	損傷なし	影響なし
6 kg 棒貫通	外表面に貫通無し 1 辺 10 cm の立方体を包 含するようなくぼみなし	影響なし

A.9.2 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件

A.9.2.1 強度試験・落下試験 I (9m 落下時)

強度試験・落下試験 I は、9 m の高さより輸送物が最大破損を受けるよう落下させる。この時の輸送容器の変形と収納物の受ける影響について評価する。

輸送容器については、コーナー落下を除いて、全て実機試験を実施した。収納物の中で最も重量の大きい 17×17 型燃料集合体の形状と重量を模擬した模擬重量体を用いたが、特に水平落下については UO₂ペレットの代わりに重量を模擬した Pb-Sb ペレットを用いた収納物最大重量である 17×17 型燃料集合体の模擬燃料集合体を用いた。

その結果、いずれの姿勢でも燃料棒は密封性が損われることなく、また燃料集合体はその形状を保って輸送容器にとどまることがわかった。

臨界安全評価の観点からは、輸送容器の変形については水平落下により容器全長にわたって変形した 2 個の容器が隣接する場合が最も厳しい。以下に試験による水平落下における模擬燃料集合体変形量及び容器の変形結果について記述する。

また、解析による垂直落下における燃料棒及び収納物の強度評価及び原型容器試験による垂直落下の場合の容器の変形結果について記述する。

さらに傾斜落下についても同様の評価を行った。

(a) 解 析

垂直落下に対する原型容器試験では重量と形状を模擬した模擬重量体を用いたので燃料棒に生じる圧縮応力と座屈については別途解析する必要がある。

圧縮応力は収納物である燃料ペレットの重量を除く燃料集合体の重量に計測された衝撃加速度を乗じた荷重が燃料棒（被覆管）にかかるとして求める。

さらにこの圧縮応力が燃料棒を座屈に至らすものかどうかを検討する。座屈は薄肉円筒殻の軸圧縮座屈と柱についてのオイラー座屈の両方を考慮する。

(b) 予備落下試験

原型容器を用いた試験は 2 回行われた。これらはいずれも事前確認用のもので、この結果をもとに最終的な変更を加え最終仕様とした。重量や基本寸法はほとんど変わらないが両者の相違点は以下のとおりであり、詳細は参考資料(ロ)-A.2 に示されている。

- (i) 垂直落下時の燃料集合体用緩衝材としてバルサ材からステンレス鋼製パイプ材に変更
 - (ii) フランジ締め付けボルトの本数を 40 個から 44 個に増し、ナットの材質を SUS304 から SUS310S に変更
 - (iii) 垂直落下時の端部フランジ開口を防止するためフランジコーナーのカットを mm から mm に変更
 - (iv) リブの局所変形による燃料集合体との衝突を防止するためにスタッキングブラケットを mm から mm に短く変更
 - (v) 中性子吸収材は、ボロン入りステンレス鋼にかわり通常のステンレス鋼で模擬
- このうち(i)~(iii)は(c)項で記す 1/2 縮尺モデル試験で確認されている。

(b)-1 原型試験内容

原型試験の内容一覧表を表(ロ)A-7に示す。落下試験(I)と(II)を連続して行ったため、表中に両方を記した。集合体種類の項の模擬重量体は形状と重量を実物と合わせているが 1 本 1 本の燃料棒までは合わせていない。第 2 回水平落下で使用した燃料集合体モデルのうちの 1 つは UO₂ペレットの代わりに Pb-Sb ペレットを用いて実際の燃料集合体と全く同じ形をした模擬燃料集合体である。

模擬燃料集合体、模擬重量体、容器には加速度計が取付けられている。

(b)-2 落下試験装置

落下試験に用いた試験台は参考資料(ロ)-A.2に示すように縦m、横m、厚さm、重量トンのコンクリートの上に、同じく縦m、横m厚さmmの鋼板が敷かれ、コンクリートと鋼板の間には両者を密着させるため厚さmmの無収縮モルタルが注入されている。

落下試験手順として、トンクレーン車で供試体を吊り上げ、所定の姿勢に調整し落下高さを確認した後マグネット式切離し装置を作動させる。取付けられた加速度計の出力はデータレコーダに収録され、金属どうしの衝突時に発生する高周波ノイズをカットするためにHzのローパスフィルタを通して再生され、最大加速度が読みとられるようになっている。

(b)-3 落下試験結果

落下試験の詳細は参考資料(ロ)-A.2 記されているので、ここでは計測された最大加速度と容器の変形量をまとめて表(ロ)A-7に示すことにする。

表より垂直落下による容器の最大加速度は□□G、模擬重量体の最大加速度は□□Gであり、水平落下による容器の最大加速度は□□G、模擬燃料集合体の最大加速度は□□G、傾斜落下による容器の最大加速度は□° 傾斜のときで□□G、模擬重量体の最大加速度は同じく□° 傾斜のときで□□Gとなっている。第2回目における水平落下の模擬集合体と□° 傾斜の模擬重量体での加速度が第1回目より数倍大きくなったのは、模擬体と上側ケースの内筒リブが衝突したためである。このとき模擬燃料集合体に打傷が生じていたが、試験後に実施したHeリーク試験の結果異常なく、密封性は保たれていた。この点について最終仕様では上述(iv)のような改造を実施している。

(c) モデル試験

原型容器試験実施後に(b)項で記載したような容器の改造を行ったため、この効果を確認する目的で1/2縮尺モデルによる落下試験を実施した。

(c)-1 1/2縮尺モデルの概要

1/2縮尺モデル容器と原型容器及び最終仕様の主要寸法比較及び構造の相違点を参考資料(ロ)-A.3に示す。

(c)-2 落下試験内容

縮尺モデルの試験内容一覧表を表(ロ)A-8に示す。落下試験(I)と(II)を連続して行ったため、表中に両方を記した。

(c)-3 落下試験装置

落下試験装置は原型容器試験に用いたものと同じである。

(c)-4 落下試験結果

上側ケースからの水平落下では輸送容器□□G、模擬重量体で□□Gの最大加速度が発生し、接地した上側ケースは全長にわたり□□mmへこんだ。

フランジ面からの水平落下では輸送容器で□□G、模擬重量体で□□Gの最大加速度が発生し、接地したフランジが容器内部にくいこむような変形をした。

下部側端板からの垂直落下では、輸送容器で□□G、模擬重量体で□□Gの最大加速度が発生した。

下側ケースの上部ノズル側を落下面とした□□°の傾斜落下では輸送容器□□G、模擬重量体で□□Gの最大加速度が発生した。

加速度及び変形は縮尺則が成立するため、実機に比べ加速度は□倍、変形は□になる。

このことから縮尺モデルで計測された加速度を実機に換算すると水平落下の場合で容器□ G、模擬重量体□ G、垂直落下の場合で容器□ G、模擬重量体□ G、□° 傾斜落下の場合で容器□ G、模擬重量体□ Gとなる。この値及び変形の結果を原形容器の結果と比較すると

- (i) 垂直落下時の燃料集合体用緩衝材としてバルサ材からステンレス鋼製パイプ材に変更したが、模擬重量体の加速度は小さくなった。
- (ii) 垂直落下時に端部フランジ開口を防止するため、締め付けボルトを増やしフランジコーナーのカットを大きくしたが、付属書類(ロ)・A.2の写真より明らかなように開口部は□ mmから□ mm(実尺容器に換算して□ mm)に減少した。
- (iii) リブの局所変形による燃料集合体との衝突を防止するためにスタッキングブラケットを短くした。衝突による打傷は依然として残ったものの水平落下のときの模擬体の加速度は□ Gから□ Gに減少している。
- (iv) フランジ面からの水平落下試験は原型容器試験では行われなかったものである。計測された加速度を縮尺則で実機に換算すると、輸送容器で□ G、模擬重量体で□ Gになる。原型容器試験の上側ケースからの水平落下の場合の最大加速度と比較すると、容器でほぼ同じ、燃料棒に対しては原型容器試験の方が□倍大きい結果となっている。

表(ロ)A-7 原型容器試験の条件と結果の一覧表

試験番号	容器番号	落下方向	落下高さ (m)	接地箇所	集合体種類	最大加速度 (G)		容器変形量
						輸送容器	燃料集合体	
第 1 回	No.1	水	9	上側ケース	模擬重量体 2 体			
		□ 傾斜	9	下側ケース上部側	" "			
		垂直	9	下部側	" "			
		垂直貫通	1	下部ケース下部側 端板中央部	" "			
		垂直貫通	1	下部側フランジ 中央部	" "			
第 2 回	No.1	水	1	上側中央部	" "			
		丸棒の落下	1	上部ケース胴板上 上側ケース可融栓上	" "			
		垂直	9	下部側	" "			
	No.1	垂直貫通	1	上側ケース下部側 端板中央部	" "			
		□ 傾斜	9	上側ケース上部側 コーナー	" "			
	No.2	水	9	上側ケース	模擬集合体 1 体			
		水平貫通	1	上側ケース中央部	模擬重量体 1 体			

表(ロ)A-8 1/2縮尺モデル試験の条件と結果の一覧表

落下方向	落下高さ (m)	接地箇所	集合体種類	最大加速度 (G)		容器変形量
				輸送容器	燃料集合体	
水 平	9	上側ケース	模擬重量体			
水 平	9	フランジ面	"			
垂 直	9	下部側	"			
11° 傾斜	9	下部ケース 上部ノズル側	"			
水平貫通	1	上部ケース中央部	"			
水平貫通	1	フランジ面	"			
13° 傾斜 貫 通	1	下側ケース	"			
垂直貫通	1	上側ケース 上部ノズル側	"			
垂直貫通	1	下部側ケース 上部ノズル側	"			

A.9.2.1.1 垂直落下

垂直落下については以下の内容を記載する。

- (1) 燃料棒に生じる圧縮応力によって燃料棒が破損または座屈しないこと
- (2) 収納物の変形
- (3) 輸送容器内に収納物が留まることの評価
- (4) 輸送容器の変形

A.9.2.1.1.1 燃料棒の健全性の評価

垂直落下により燃料棒には大きな圧縮応力が生じる。落下試験の結果から表(ロ)A-7より模擬重量体には最大 270 G の加速度がかかっている。最終仕様では燃料集合体用の緩衝材としてパルサ材からパイプ材に変更している。1/2 縮尺モデルでこの緩衝効果を確認したところ縮尺則を考慮して実機に換算した加速度で 200 G となった。ここでは大きめの値として原型容器試験の結果を用いる。また荷重はペレットを除く燃料集合体の全重量が燃料棒にのみかかるとして評価する。なお、燃料棒組立体に対する評価はより重量の大きい燃料集合体に包絡され、17×17 型タイプ 64 に対する評価は被覆管肉厚の薄い 17×17 型タイプ 57 の結果に包絡されることから評価を省略する。

このときの燃料棒 1 本に発生する圧縮応力 σ_c は下式で表される。

$$\sigma_c = \frac{WG\alpha}{An} = \frac{WG\alpha}{\frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2)n}$$

ここで

W ペレットを除いた燃料集合体重量

kg (14×14 型)

kg (15×15 型)

kg (17×17 型タイプ 57)

G 重力加速度 9.80665 m/s²

α 最大加速度 G

A 燃料棒断面積 = $\frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2)$

d_o 燃料棒外径

d_i 燃料棒内径

n 燃料棒本数 179 本 (14×14 型)

204 本 (15×15 型)

264本 (17×17型タイプ57)

$d_o = 10.72 \text{ mm}$ (14×14型, 15×15型)

9.50 mm (17×17型タイプ57)

$d_i = 9.40 \text{ mm}$ (14×14型, 15×15型)

8.36 mm (17×17型タイプ57)

これらを用いると

$\sigma_c = \square \text{ MPa}$ (14×14型)

$= \square \text{ MPa}$ (15×15型)

$= \square \text{ MPa}$ (17×17型タイプ57)

基準値は表(ロ)A-3より $\square \text{ MPa}$ である。したがって燃料棒に発生する応力は基準値より小さく安全である。

燃料棒の座屈について検討する。燃料棒は肉厚が薄いため円筒殻の座屈モードを考える必要がある。文献(3)の第7章では座屈応力と形状係数として次式が与えられている。

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{L}\right)^2$$

$$Z = \sqrt{1-\nu^2} \frac{L^2}{Rt}$$

ここで

σ_{cr} 座屈応力 MPa

k 座屈係数

E 縦弾性係数 93655 MPa

ν ポアソン比 0.3

t 肉厚 $\square \text{ mm}$ (14×14型, 15×15型)

$\square \text{ mm}$ (17×17型タイプ57)

L 長さ mm

Z 形状係数

R 平均半径 5.03 mm (14×14型, 15×15型)

4.47 mm (17×17型タイプ57)

長さLとして支持格子間隔を用いる。支持間隔は

L = $\square \text{ mm}$ (14×14型, 15×15型)

L = $\square \text{ mm}$ (17×17型タイプ57)

これを用いると

Z = \square (14×14型, 15×15型)

$$Z = \boxed{} \text{ (17} \times \text{17 型タイプ 57)}$$

この形状係数 Z が大きいということは円筒かくが極めて長く柱としてのオイラー座屈を考慮すべきことをしめしている。オイラーの座屈応力 σ_k は

$$\sigma_k = n \pi^2 E / \lambda^2$$

ここで

n 柱の端末条件で定まる係数、両端固定の場合 4

E 縦弾性係数 93655 MPa

λ 柱の細長比

$$= L / k$$

k 断面二次半径

$$= \sqrt{I / A}$$

I 断面二次モーメント mm^4

$$= \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4)$$

A 断面積 mm^2

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

14 \times 14 型, 15 \times 15 型燃料集合体の場合

$$d_o = \boxed{} \text{ mm}$$

$$d_i = \boxed{} \text{ mm}$$

$$A = \boxed{} \text{ mm}^2$$

$$I = \boxed{} \text{ mm}^4$$

$$k = \boxed{} \text{ mm}$$

$$\lambda = \boxed{}$$

$$\sigma_k = \boxed{} \text{ MPa}$$

17 \times 17 型タイプ 57 燃料集合体の場合

$$d_o = \boxed{} \text{ mm}$$

$$d_i = \boxed{} \text{ mm}$$

$$A = \boxed{} \text{ mm}^2$$

$$I = \boxed{} \text{ mm}^4$$

$$k = \boxed{} \text{ mm}$$

$$\lambda = \boxed{}$$

$$\sigma_k = \boxed{} \text{ MPa}$$

よって発生応力はこれらの座屈応力より小さく、座屈に至らない。

A.9.2.1.1.2 燃料集合体の変形

2 回の原型容器試験及び 1/2 縮尺モデル試験とも、模擬重量体とこれを押さえて固定する弓型クランプの U サポートの間に長手方向のすべりが生じていたが、弓型クランプの破損による燃料集合体拘束機能に異常はなく、従って燃料集合体がバラバラになることはない。

燃料集合体とストロングバックの間にある中性子吸収材の破損や位置のズレは水平落下の場合に比べてわずかであり、その健全性については「A.9.2.1.5 結果の要約」で評価する。

A.9.2.1.1.3 輸送容器の変形

(1) ロッドボルト

上側ケースと下側ケースを止めるロッドボルトは試験容器のとき計 40 本であった。垂直落下試験ではこのうち、接地側に近い 2 本が折損した。このときフランジ部のすき間は最大で約 mm の開きがあったが位置決めピンは折損しておらず燃料棒または燃料集合体が容器外に飛び出すには至らなかった。1/2 縮尺モデルではボルトの本数を 44 本にし、フランジコーナの切欠きを大きくすることで、フランジ部のすき間が mm (実尺容器に換算して mm) に小さくなることを確認した。

(2) 容器の変形

容器は垂直落下によって全断面にわたり大きな圧縮応力を受ける。試験後の計測では容器の全長が mm 縮まった。

A.9.2.1.1.4 結果のまとめ

9 m からの垂直落下は原型容器試験と最終仕様への設計変更点を反映した 1/2 縮尺モデル試験で模擬重量体の受ける加速度や容器の変形量を確認した。

計測された模擬重量体の加速度から燃料集合体に生じる圧縮応力を求め座屈しないことを確認した。

燃料集合体の落下と直角方向の動きは弓型クランプで拘束されている。この弓型クランプは落下後も破損しないので、燃料集合体は防振構造部から落下方向に対し直角方向に移動することはない。

中性子吸収材もその機能を損なうことはない。

A.9.2.1.2 水平落下

水平落下については模擬燃料集合体を組み込んだ落下試験を行っており、その結果を引用する。

A.9.2.1.2.1 燃料棒の健全性

容器の上側ケースを下にした落下姿勢の場合、燃料集合体を固定する防振ゴムが衝撃のため下方に伸び、燃料棒の一部が内筒リブに衝突し、へこみを生じた。しかし報告書に記載されているとおり、燃料棒の密封性能に異常はなかった。

1/2 縮尺モデルによるフランジ面からの落下試験で計測された最大加速度を縮尺則で換算すると原型試験で計測された方が大きかった。このことからフランジ面からの落下においても燃料棒の密封性能は保たれることがわかる。

A.9.2.1.2.2 燃料集合体の健全性

燃料集合体は弓型クランプと U サポートで固定されているが、落下の衝撃で U サポートが曲がり衝撃吸収したため弓型クランプの変形、固定ボルトのはずれ等はなかった。このため支持格子に変形はあったものの燃料集合体が破損することはなかった。

1/2 縮尺モデルによるフランジ面からの落下試験では弓型クランプに破損は見られず、この方向からの落下においても燃料集合体がバラバラになることはない。

A.9.2.1.2.3 中性子吸収材の健全性

中性子吸収材を止めるビスの一部は切断され、ステンレス鋼板に局所的な変形が生じたが、所定の位置から外れることはなかった。ボロン入りステンレス鋼の健全性については、「A.9.2.1.5 結果の要約」で評価する。

A.9.2.1.2.4 輸送容器の変形

輸送容器の上側ケースでは接地面である上部が全長にわたり均一に約 \square mm の変形を生じた。

下側ケースでは容器中央部で曲がったようなしわ模様が生じていた。上側ケースと下側ケースの位置決めピンは 8 本中 5 本が根元から切断したがフランジ締め付けボルトは切損せず、落下衝撃によって上・下ケースが開くことはなかった。

1/2 縮尺モデルによるフランジ面からの落下試験では、フランジが容器内部に食い込んだが、落下衝撃によって、上・下ケースが開くことはなかった。

A.9.2.1.3 コーナー落下

コーナー落下の姿勢での試験は行われなかったが、一般的に垂直落下とコーナー落下を比較すると、変形はコーナー落下の方が大きくなる反面、衝撃加速度は垂直落下の方が大きくなる。従って燃料棒及び燃料集合体の健全性は垂直落下の項で示されたと考え、ここでは輸送容器の変形について計算する。計算は「A.5.3 自由落下」で示された方法と同じとする。

A.9.2.1.3.1 輸送容器の変形

「A.5.3 自由落下」と同様にして次式で求める。

$$EA = EB + Es$$

$$= \frac{1}{2} tBR^2(2\theta_0 - \sin 2\theta_0)dEB + 2tR^2 \tan \Theta (\sin \theta_0 - \theta_0 \cos \theta_0)dEs$$

ここで

EA 全変形吸収エネルギー N・mm

EB 底板による吸収エネルギー N・mm

ES 側板による吸収エネルギー N・mm

TB 底板の板厚 □mm

Ro 外筒の半径 □mm

θ_0 接地部の角度の半分

t 側板の板厚 □mm

Θ 落下角度 □°

dEB 底板の単位体積当りひずみエネルギー □N・mm/mm³

dES 側板の単位体積当りひずみエネルギー □N・mm/mm³

ここで

Ec 9 m での位置エネルギー

W 輸送物の全重量 □kg

H 落下高さ 9,000 mm

G 重力加速度 9.80665 m/s²

よって

$$Ec = \square N \cdot mm$$

EA=Ec となる θ_0 を求めると

$$\theta_0 = 1.693 \text{rad} = 97.0 \text{度}$$

このときの側板の変形量 h_s は

$$\begin{aligned} h_s &= R_o (1 - \cos \theta_o) \tan \Theta \\ &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \text{ mm} \end{aligned}$$

底板の接地部の長さ b は

$$\begin{aligned} b &= R_o (1 - \cos \theta_o) \\ &= \boxed{} \\ &= \boxed{} \text{ mm} \end{aligned}$$

ここで外筒の変形が内筒のコーナまで及んでいるか否かの検討をしておく。図(ロ)A-16に示すように外筒コーナと円筒コーナを結ぶ角度 α は次式で表される。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{HB}{H_s}$$

ここで

$$\begin{aligned} HB & \text{ 内筒と外筒の底板部での間隔 } \boxed{} \text{ mm} \\ H_s & \text{ 内筒と外筒の側板部での間隔 } \boxed{} \text{ mm} \end{aligned}$$

従って

$$\alpha = \boxed{} \text{ 度}$$

傾斜角度 Θ のときのコーナ間の距離 H_c は次式で表わされる。

$$H_c = \sqrt{H_s^2 + HB^2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \Theta - \alpha\right)$$

よって 11.72 度以下での落下の大きさの距離 H_c は

$$H_c = \boxed{} \text{ mm}$$

となる。

一方、側板の変形量 h_s のときの、コーナの鉛直方向への移動量 δc は

$$\begin{aligned} \delta c &= h_s \cos \Theta \\ &= \boxed{} = \boxed{} \text{ mm} \end{aligned}$$

となり、外筒の変形は内筒にも及ぶ。しかしここでは変形を大きくみこむ方が安全側となるため、内筒の変形によるエネルギー吸収は無視することにする。

変形による容積の減少量は

$$V_c = \frac{h_s}{3b} \{ a(3R_o^2 - a^2) + 3R_o^2 (b - R_o) \theta_o \}$$

ここで

$$hs = \boxed{} \text{ mm}$$

$$b = \boxed{} \text{ mm}$$

$$\theta_0 = \boxed{} \text{ rad}$$

$$R_0 = \boxed{} \text{ mm}$$

$$a = R_0 \sin \theta_0 = \boxed{} \text{ mm}$$

よって

$$V_c = \boxed{} \text{ mm}^3$$

これは容器の全体積 $\boxed{} \text{ mm}^3$ に比べ $\boxed{} \%$ の減少割合となる。



図(ロ)A-16 内筒と外筒の位置関係

A.9.2.1.4 傾斜落下

傾斜落下は水平線と容器長手軸の角度が□° と□° の 2 ケースについて実験されている。

□° 傾斜落下で計測されている加速度を水平落下の場合と比較すると二次衝撃の場合も含めて、水平落下による方が大きいことがわかる。

□° 傾斜落下の場合を水平落下と比較すると容器については水平落下の方が大きい。また水平落下の模擬集合体と傾斜落下の模擬重量体の加速度を比べると、水平落下の方が大きい。

これらのことから水平落下での燃料棒の健全性評価が傾斜落下でも有効となる。

1/2 縮尺モデルによる□° 傾斜落下では輸送容器の最大加速度の縮尺則による換算値が □ G で、原型試験での□° 傾斜落下より大きい水平落下の場合とほぼ同じとなっている。

一方容器の変形では□° 傾斜落下での衝突部の変形は幅□ mm、高さ□ mm、長手方向□ mm へコミが生じていた。

□° 傾斜落下の場合と水平落下の場合とも同じように上側ケースが均一に□ mm の変形をし、下側ケースが容器中央部で曲げ変形した。

A.9.2.1.5 結果の要約

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件では、一般の試験条件の後、続いて 9 m の高さから落下させることとしている。

「A.9.2.1.1 垂直落下」から「A.9.2.1.4 傾斜落下」に記述してきた評価は変形量の評価において一般の試験条件での変形を考慮していない。このため、に示した変形量を加算して、特別の試験条件に対する最大変形量とする。

評価結果を表(ロ)A-9 に示す。

表(ロ)A-9 9 m 落下後の最大変形量

落下姿勢	変形量	最大変形量
垂 直	変形高さ： □ mm	□ mm
水 平	変形高さ： □ mm	□ mm
コーナ-	変形高さ： □ mm	□ mm

輸送容器が特別の試験条件 I の各落下姿勢で受ける密封性能、臨界性能に対する影響をまとめるといずれの落下姿勢においても次のことがいえる。

- (i) 燃料棒の密封性能は損われない。
- (ii) 燃料集合体を固定する弓型クランプは健全で、燃料棒がバラバラに容器内に飛散するようなことはない。
- (iii) 中性子吸収材は所定の位置から外れることはなく変形も局所的である。変形は水平落下で最大となるが、伸びは□%未満でありボロン入りステンレス鋼の伸び□%に比べて極めて小さく健全性上問題ない。
- (iv) 容器の上側ケースと下側ケースは外れて開くことはなく、従って内容物が容器外に飛び出すことはない。
- (v) 燃料集合体の変形は局所的な圧縮変形であり、臨界安全上反応度を減少させる方向である。

各落下姿勢における変形状態を比較すると、臨界安全上水平落下が最も厳しい条件となる。このときの容器の変形は長手方向全長に亘り均一に深さ約□mm であるが、収納物である燃料集合体表面からケースの間には、□mm 以上の距離が確保される。またいずれかの落下の場合も燃料集合体の形状及び中性子吸収材の健全性は保たれ、さらに燃料棒の密封性も保持される。これらの結果は(ロ)-E 臨界解析を行う際の解析モデル作成に使用される。

解析結果をまとめて表(ロ)A-10 に示す。

A.9.2.2 強度試験・落下試験 II (1 m 落下時)

直径□mm、長さ□mm 以上の軟鋼棒に□m の高さから輸送容器を落下させたときの、密封性能及び臨界性能に対する影響について実験的に健全性を確認した。

実施した試験の詳細は添付の参考資料(ロ)-A.2 及び(ロ)-A.3 に示し、ここでは結果について要約する。

A.9.2.2.1 結果の要約

- (1) 上側ケース下端中央部からの垂直落下

板厚□mm の上側ケース端板は軟鋼棒の形をした約□mm の深さの跡形が生じたが、破損や貫通には至っていない。

このとき計測された加速度は容器側で最大□G、模擬重量体で最大□G となっており、これらはいずれも落下試験 I で計測された値より小さい。

(2) 上側ケース胴中央部からの水平落下

板厚 mm の上側ケース胴板は深さ約 mm の局所的な変形を生じたが、破損や貫通には至っていない。

このとき計測された加速度は容器側で最大 G、模擬集合体で最大 G となっており、これらはいずれも落下試験Ⅰ水平落下で計測された値より小さい。

(3) 結果のまとめ

落下試験Ⅱで輸送容器ケースに丸棒が貫通することはない。ケースにはへこみが生じ、燃料集合体にも変形が生じるが、この変形は局所的な圧縮変形であり、臨界安全上反応度を減少させる方向である。また燃料棒の密封性も損われない。したがって、落下試験Ⅱの燃料集合体の変形は臨界解析上考慮する必要はない。

A.9.2.3 熱的試験

強度試験を行った容器を引続き耐火試験に供するものとして評価した。評価の結果燃料棒にかかる応力は、基準値以下であり、健全性は保たれる。この熱的試験の評価は「(ロ)-B.5 特別の試験条件」で行う。

A.9.2.3.1 圧力及び温度の要約

原型容器試験の結果、「(ロ)-B.5.3 輸送物温度」に示すように燃料被覆管最高温度は初期温度の差を考慮すると °C となる。最大内圧の評価においてはこの温度を安全側に °C として評価し問題ないことを確認している。

A.9.2.3.2 熱膨張

熱膨張により発生する応力は「B.5.5 最大熱応力」で述べるように部材間に大幅な温度差がないため、臨界評価上問題となるような大幅な変形は生じない。

A.9.2.3.3 許容応力の比較

許容応力の比較を「(ロ)-B.5.6 特別の試験条件」にまとめる。いずれの解析結果も解析基準値を満足しており安全である。

A.9.2.4 浸漬

放射性収納物である燃料棒は約 160 気圧の外圧に耐えるように設計されており、深さ 0.9 m または 15 m の水頭下に 8 時間以上浸漬しても破損することはない。

A.9.2.5 結果の要約と評価

落下試験 I により輸送容器ケースは局部的変形を受け、落下試験 I（水平落下）により収納物である燃料集合体は圧縮変形を受ける。

この変形は臨界評価上反応度が下がる方向であるので、集合体については、変形前の幾何学的形状のまま臨界計算を行うものとする。また「A9.2.1.5 結果の要約」に示したように、一般の試験条件を考慮して落下試験 I（水平落下）により輸送容器ケースは落下部分全長に亘り深さ約 □ mm の均一な変形を生じ、局部的な割れのみ生ずるが、収納物である燃料集合体は強固な弓型クランプで固定されているため輸送容器ケースとしては □ mm 以上の距離を保つことができる。また中性子吸収材は健全性を保ち、その機能を果たすことができる。これらの結果は「(ロ)-E.4 臨界評価」に用いられる。

また、収納物である燃料棒の密封性は損われず、放射性物質の損失又は散逸はない。以上ことから、特別な試験条件における輸送物の変形及び損傷の程度は許容範囲内であり、安全上問題はない。

A.10 構造解析まとめ

通常輸送時、一般の試験条件及び特別の試験条件における構造解析を実施した結果、各評価項目において要件を満足するものである。また、各条件において輸送物に生じる影響については、他の解析において保守的に考慮する。解析結果のまとめを表(ロ)A-10に示す。

表(ロ)A-10 構造解析結果

(1/4)

条件	項目	解析基準	解析基準値	解析結果	安全率
通常輸送時	1 化学的及び電氣的反応				
	(1)化学的反應	化学反応性	化学反応性 無	無	—
	(2)電氣的反應	異種材料間の電位差	電位差 無	無	—
	2 低温強度				
	(1)ケース	低温強度	強度低下 無	無	—
	(2)ロッドボルト	低温強度	強度低下 無	無	—
	(3)ガスケット	性能低下	性能低下 無	無	—
	(4)ショックマウント	性能低下	性能低下 無	無	—
	3 密封装置	—	—	—	—
	4 吊上装置				
	(1)スタッキングブランケット A断面	$0.577 \sigma_y$	118 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	(2)スタッキングブランケット B断面	σ_y	205 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
(3)スタッキングブランケット 固定 A 部溶接部	$0.61 \sigma_y$	125 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>	
(4)スタッキングブランケット 固定 B 部溶接部	$0.35 \sigma_y$	72 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>	
(5)ロッドボルト	σ_y	785 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>	
(6)胴	σ_y	205 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>	

表(ロ)A-10 構造解析結果

(2/4)

条件	項目	解析基準	解析基準値	解析結果	安全率
通常 輸 送 時	5 固縛装置 (1)ケース	—	—	—	—
	6 圧力 (1)燃料棒	σ_y (14×14型, 15×15型) (17×17型タイプ57)	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/> <input type="text"/>
	(2)燃料棒溶接部	$0.6\sigma_y$ (14×14型, 15×15型) (17×17型タイプ57)	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/> <input type="text"/>
	7 振動	破損・亀裂の有無	—	無	—

表(ロ)A-10 構造解析結果

(3/4)

条件	項目	解析基準	解析基準値	解析結果	安全率
一般の試験条件	1 熱的試験				
	(1) ケース胴部	σ_y	183 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	(2) ケース胴溶接	$0.61\sigma_y$	111 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	(3) ケースドーム板	σ_y	183 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	(4) ケースドーム板と補強リブ	σ_y	183 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	(5) ロッドボルト	σ_y	712 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	(6) 燃料棒	σ_y			
		(14×14型, 15×15型)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
		(17×17型タイプ57)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	(7) 燃料棒溶接部	$0.6\sigma_y$			
		(14×14型, 15×15型)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
		(17×17型タイプ57)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	2 水噴霧	漏えい	無	無	—
	3 自由落下				
(1) 垂直落下	変形	—	<input type="text"/> %	—	
(2) 水平落下	変形	—	<input type="text"/> %	—	
(3) コーナー落下	変形	—	<input type="text"/> %	—	
4 積み重ね					
(1) ケース	σ_y	205 MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>	
5 貫通					
(1) ケース	くぼみの体積	1辺10cmの立方体の包含	くぼみ無し	—	

表(ロ)A-10 構造解析結果

(4/4)

条件	項目	解析基準	解析基準値	解析結果	安全率
特別試験条件	1 落下試験 I	圧縮応力 σ_y			
	(1) 収納物	(14×14型)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
		(15×15型)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
		(17×17型タイプ 57)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
		座屈応力			
		(14×14型)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
		(15×15型)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
		(17×17型タイプ 57)	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	(2) ケース	変形	—	約 <input type="text"/> mm	—
		変形	—	均一な 変形 <input type="text"/> %	—
(3) 中性子吸収材	健全性	—	健全	—	
2 落下試験 II					
(1) 収納物	健全性	—	燃料棒に 影響なし	—	
(2) ケース	変形	—	局部的 変形	—	
(3) 中性子吸収材	健全性	—	健全	—	
3 浸漬試験					
(1) 燃料棒の破損	無	—	無	—	

参考資料

- 1) (口)-A.1 参照文献一覧表
- 2) (口)-A.2 NFI-V型輸送容器 予備試験結果報告
- 3) (口)-A.3 NFI-V型輸送容器 1/2縮尺モデル落下試験結果報告
- 4) (口)-A.4 使用部材の低温における性質
- 5) (口)-A.5 燃料棒被覆管の応力基準値
- 6) (口)-A.6 ショックマウントの経年変化における安全評価への影響確認
- 7) (口)-A.7 固有振動数導出に係る補足説明資料

参考資料 (ロ)－A.1

参 照 文 献 一 覧 表

- (1) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2001 (日本機械学会)
- (2) “使用済核燃料輸送容器の構造解析プログラムの開発・調整に関する調査報告書 (Ⅲ)” 日本機械学会, 1985. 11
- (3) 機械工学便覧第4編 材料力学、日本機械学会

参考資料(口)-A.2

NFI-V 型輸送容器 予備試験結果報告

参(口)A.2-1

目 次

1.はじめに

2.試 験

2.1 実施場所と実施時期

2.2 試 験 体

2.3 試験用機材

2.4 試験方法

3.試験結果

3.1 最大加速度値

3.2 落下試験後の状況

4.ま と め

添 付 資 料

添付 1： 落下試験台の説明資料

添付 2： 落下試験実施順序

添付 3： 落下試験写真集

1.はじめに

本報告書は、NFI-V 型輸送容器の原型容器 2 基を用いた予備落下試験について試験状況及び試験後の容器の検査結果をまとめたものである。本落下試験は、事前確認用として実施しており、この試験結果を基に若干設計変更を加えて、NFI-V 型輸送容器の最終仕様としている。

2. 試験

2.1 実施場所と実施時期

実施場所

実施時期

--

2.2 試験体

落下試験 I, II に用いた原型容器は、次の点を除いて NFI-V 型輸送容器と同じである。

2.2.1 収納物の相違点

試験容器には模擬燃料集合体 (図(ロ)A 参 2-1) と模擬重量体 (図(ロ)A 参 2-2) を組合せて収納した。なお、模擬燃料集合体は、 UO_2 ペレットのかわりに重量を模擬した Pb-Sb ペレットを用いている点を除き、材質・寸法等は実際の燃料集合体と同じである。

2.2.2 最終仕様との相違

- (1) ロッドボルトの本数は 44 本ではなく 40 本である。
- (2) 緩衝体はステンレスパイプではなくバルサ材である。
- (3) 加速度計を取付けるためリリーフバルブを取除いた。つまり、コネクタ保護板に設けた貫通孔とリリーフバルブを取付ける孔を通して加速度計の配線を取り出した。
- (4) 脚部に吊り穴を設けた。

2.3 試験用機材

(1) 原型容器 2 台

詳細は 2.2 試験体に示したとおり。

重量は約 kg である。

(2) 収納物

1 号機： 重量模擬体 2 体

2 号機： 重量模擬体 1 体、模擬燃料集合体 1 体

(3) 落下試験台

所有の試験台を使用した。仕様を添付 1 に示す。

- (4) クレーン
35 トンクレーン車を使用した。
- (5) 切離し用吊り具
[] 所有の容量 6 トンの吊具を借用した。
- (6) 加速度計
[] 製の [] を使用した。
取付位置と個数については以下のとおり。

- 1号機 : 容器外側 2 個、内部の重量模擬体 2 個の計 4 個
2号機 : 容器外側 2 個、内部の模擬燃料集合体 4 個、
内部の重量模擬体 2 個の計 8 個

2.4 試験方法

試験順序を添付 2 に示す。1号機を用いた落下試験の後、2号機を用いて落下試験を行った。容器を吊上げるにはシャックル、ワイヤを利用した。容器落下後に吊上げ器具等が容器上に落下しないように鋼を付ける等考慮した。

2.4.1 1号機を用いた試験

- (1) 貫通試験
上側ケースの上部に貫通用丸棒を 1m の高さから落下させた。落下地点はステンレス板の部分と可融栓の部分の 2 箇所とした。
- (2) 落下試験 (I) 9m 垂直落下
図(ロ)A 参 2- 3 に示すように、下部ノズル側を下向きとして落下させた。姿勢の制御には脚部の吊穴とスタッキングブラケットの吊穴をそれぞれ 2 箇所ずつ用いた。
- (3) 落下試験 (II) 1m 垂直ターゲット落下
(2)と同様にして落下させるが、貫通治具が上側ケース端板の中央に当たるように落下させた。
- (4) 落下試験 (I) 9m 傾斜落下
図(ロ)A 参 2- 4 に示すように、上側ケース上部ノズル側を下向きとして 10°傾斜させて落下させた。姿勢の制御は脚部の吊穴 (4 箇所) を用いて行

った。

2.4.2 2号機を用いた落下試験

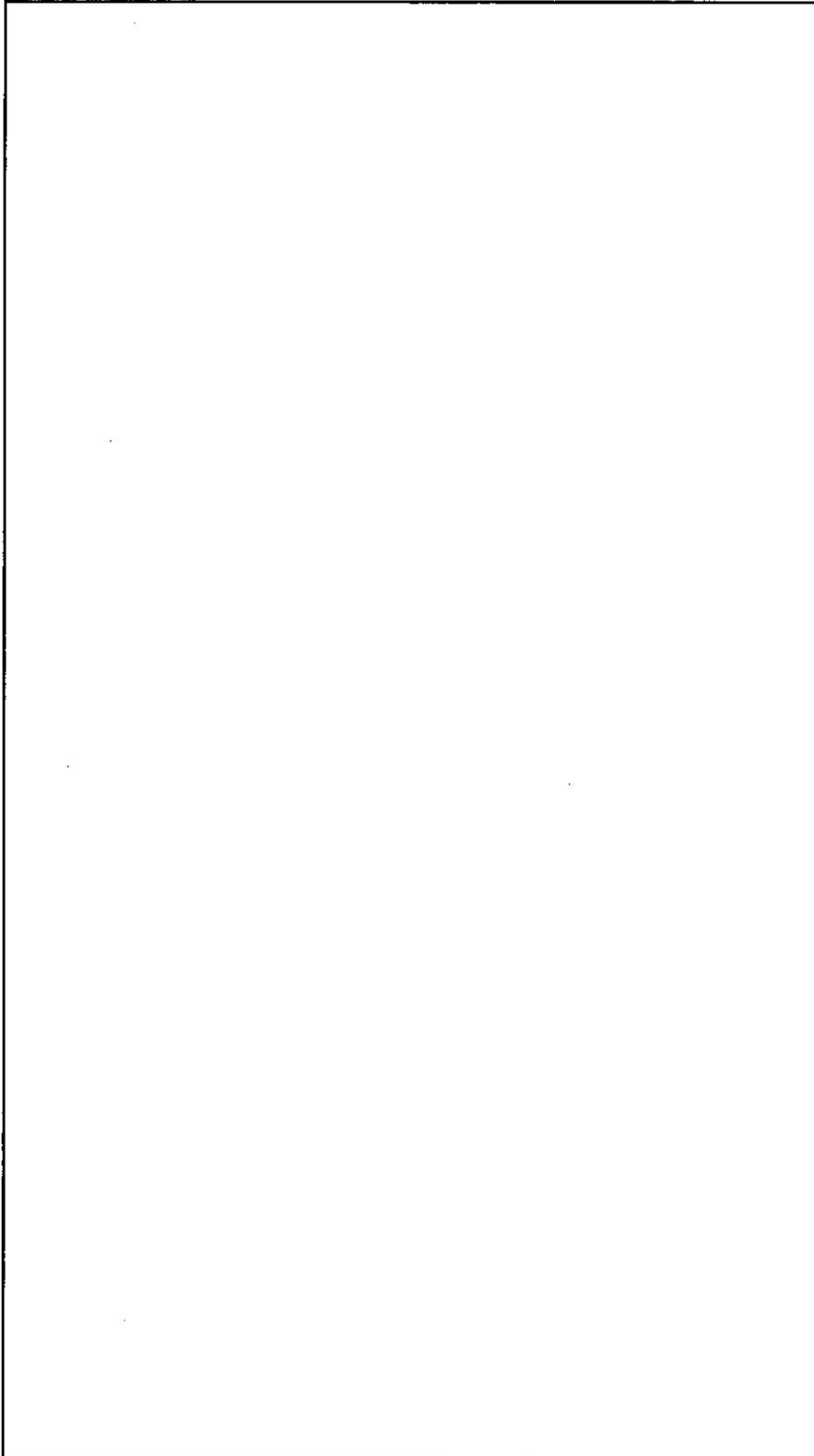
(1) 落下試験 (I) 9m 水平落下

図(ロ)A 参 2-5に示すように、上側ケースを下向きとして水平に落下させた。

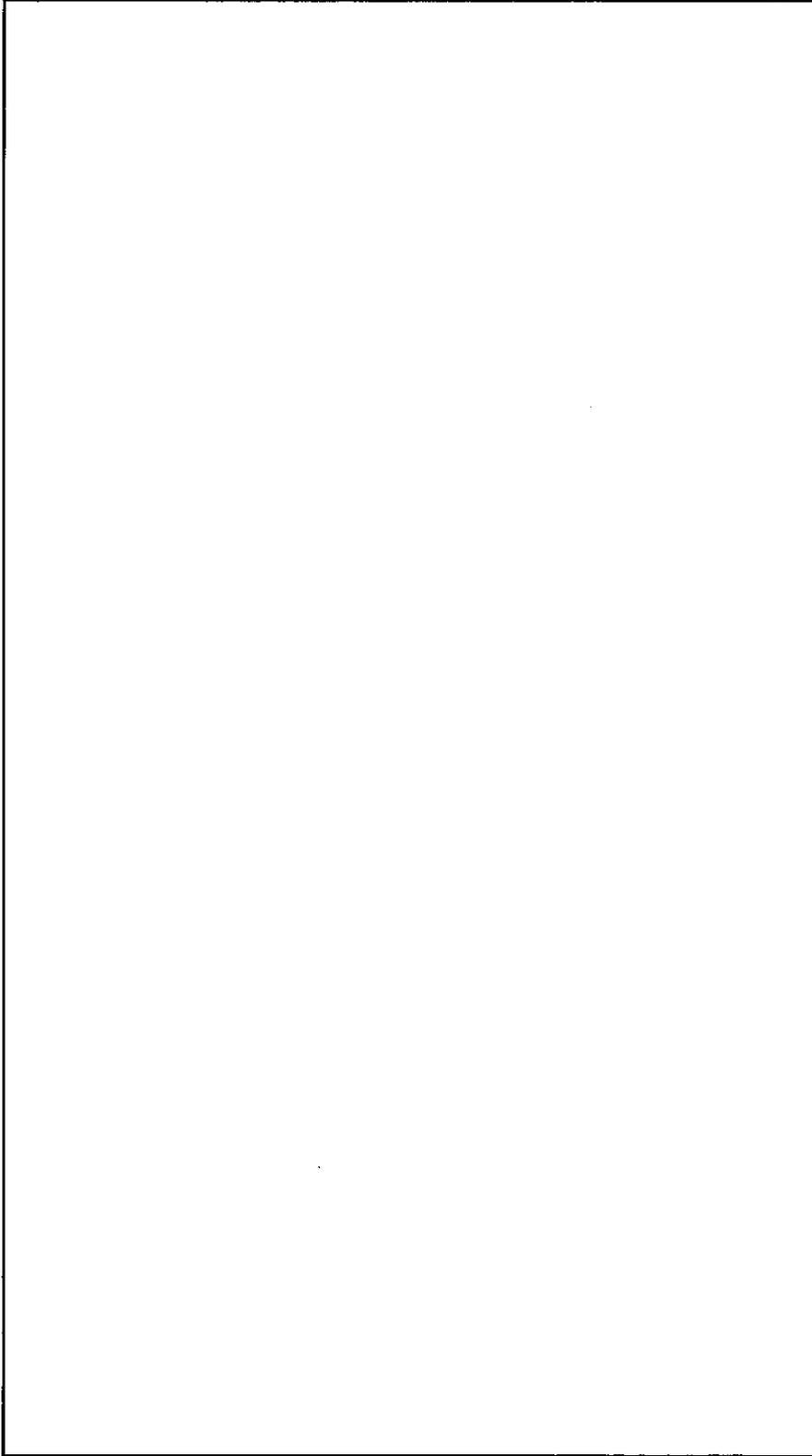
姿勢の制御には脚部の吊穴 (4 個所) を用いた。

(2) 落下試験 (II) 1m 水平ターゲット落下

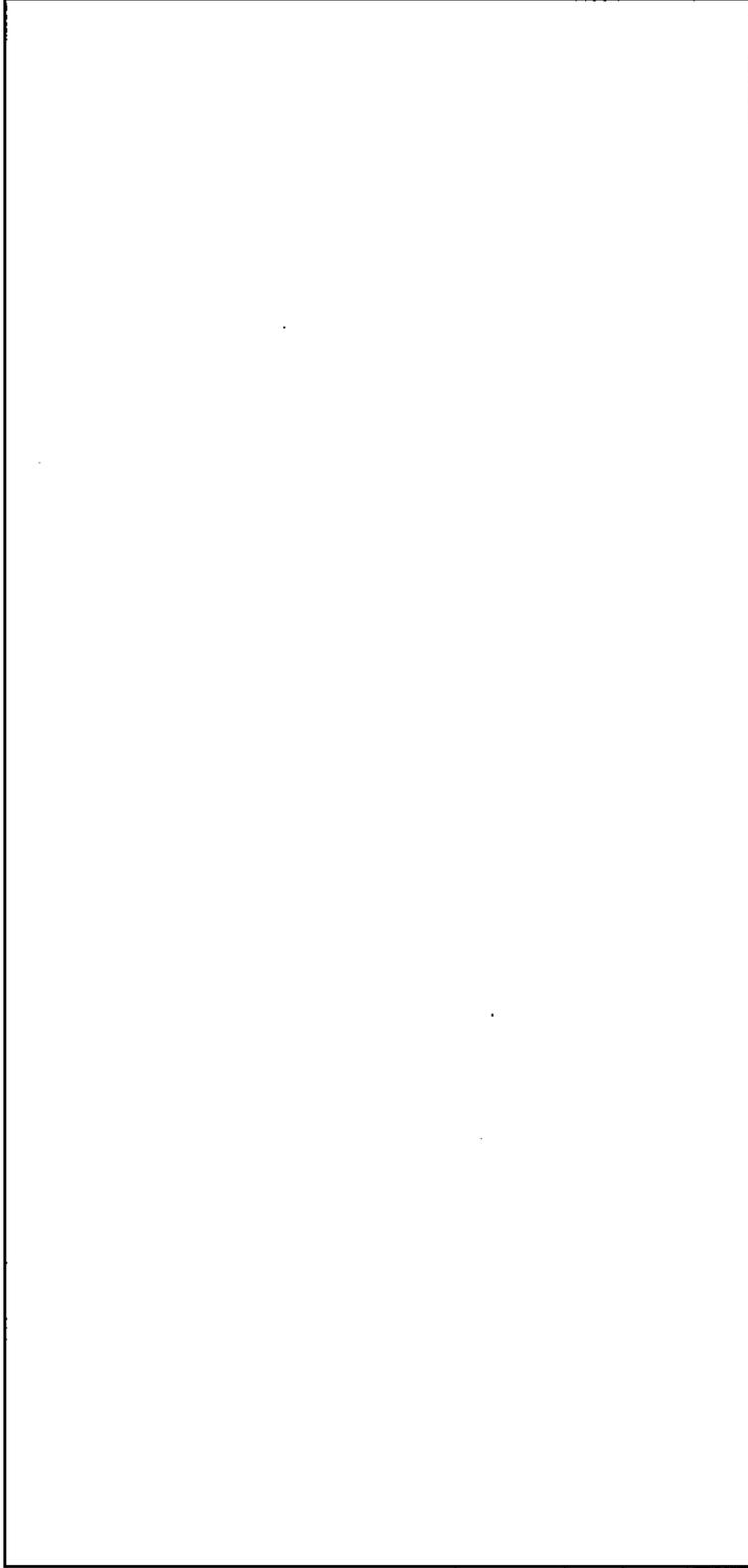
(1)と同様にして落下させるが、貫通治具が上側ケース中央部に当るように落下させた。



図(ロ)A 参 2-1 模擬燃料集合体の構造



図(ロ)A 参 2-2 模擬重量体の構造



図(口)A 参 2-5 水平落下

図(口)A 参 2-4 傾斜落下(□°)

図(口)A 参 2-3 垂直落下

3. 試験結果

3.1 最大加速度

各落下試験において容器本体と、内部の重量模擬体及び模擬燃料集合体に発生した最大加速度を表(ロ)A 参 2- 1 に示す。最大加速度は、金属どうしの衝突時に発生する高周波ノイズをカットするために □Hz のローパスフィルタをかけて求めた。

3.2 落下試験後の状況

落下試験中には、カメラ及び 8 ミリビデオ等を用いて撮影を行った。その写真を最後にまとめた。以下にその写真を参考にしながら説明する。

3.2.1 1号機を用いた試験について

(1) 貫通試験後

(a) 容器の上側ケースに、わずかな凹みが生じたのみであった。(写真(ロ)A 参 2- 1 及び写真(ロ)A 参 2- 2)

(2) 落下試験 (I) 9m 垂直落下後

落下試験 (I) 9m 垂直落下試験前の原型容器を写真(ロ)A 参 2- 3 に示す。

(a) 落下面両側のフランジ部が、容器端部の締付けボルトの間で大きく変形した。この結果フランジ部のすき間は最大で約 □mm 開き、すき間から容器内部が目視できる。(写真(ロ)A 参 2- 4)

(b) フランジの変形によりフランジと外筒の溶接部が一部切断された。

(c) フランジ変形部では締付けボルトの一部が切断されたが、位置決めピンは切断されていなかった。(写真(ロ)A 参 2- 5)

(d) 容器の全長は約 □mm 縮まった。

(3) 落下試験 (II) 1m 垂直落下後

(a) ターゲットは上側ケース端板の中央部に当たったために、上側と下側のケースにずれが生じ位置決めピンは 2 本とも切断された。(写真(ロ)A 参 2- 6)

(b) 落下面のフランジと外筒の溶接部に破損は生じなかった。

(c) ターゲットによる変形の深さは約 □mm であった。

(d) 締付けボルトの一部にゆるみが生じたが外れたものはなかった。

- (4) 内部状況の検査後
- (a) 下部ゲートは健全であったが、トグルクランプは変形破損した。
(写真(ロ)A 参 2-7)
 - (b) Uサポート、弓型クランプ及びショックマウントは健全であった。
(写真(ロ)A 参 2-8)
 - (c) ストロングバック固定ボルトは変形し、下部の位置決めピンは 3 本とも破損していた。(写真(ロ)A 参 2-9)
- (5) 落下試験 (I) \square° の傾斜落下後
- (a) 上側ケースは均一に \square mm 変形した。(写真(ロ)A 参 2-10)
 - (b) 下側ケースは容器中央部に曲げ変形を生じた。(写真(ロ)A 参 2-11)
 - (c) フランジ締付けボルトの一部にゆるみが生じたが、外れたものはなかった。位置決めピンは 2 本破損した。
- (6) 内部状況の検査後
- (a) 重量体を固定している弓型クランプが上側ケースの内筒に当たった跡がある。(写真(ロ)A 参 2-12)
 - (b) 重量体を上下方向に押さえる支持格子押さえ板は大きく変形しているが、左右方向の押さえ板は異常ない。(写真(ロ)A 参 2-13)
 - (c) 重量体は中央が陥没する変形を生じ、表面に内筒リブに当たった打傷があった。(写真(ロ)A 参 2-14)
 - (d) ボロン入り SUS 板には変形が生じたが、所定の位置から外れることはなかった。

3.2.2 2号機を用いた落下試験後

- (1) 落下試験 (I) 9m 水平落下後
 - (a) 上側ケース全長に均一に約 \square mm の変形を生じた。(写真(ロ)A 参 2-15)
 - (b) 下側ケースは容器中央部に曲げ変形を生じている。(写真(ロ)A 参 2-16)
 - (c) 容器側面の位置決めピンは 8 本中 5 本が根元から切断されていた。
(写真(ロ)A 参 2-17)

- (2) 落下試験 (II) 1m ターゲット水平落下後
 - (a) 容器中央部に深さ約 \square mm の大きな変形を生じた。締付けボルトの一部に緩みが生じていたが、損傷はなかった。(写真(ロ)A 参 2-18)

- (3) 内部状況の検査後
 - (a) 燃料集合体を固定している弓型クランプが上側ケースの内筒に当たった跡がある。この時の衝撃により中央部が溶接線に沿って切断され、また貫通穴が生じている。(写真(ロ)A 参 2-19)
 - (b) 燃料集合体を上下方向に押さえる支持格子押さえ板は大きく変形しているが、左右方向の押さえ板は異状ない。(写真(ロ)A 参 2-20)
 - (c) 燃料集合体は中央が陥没する変形を生じ、表面に内筒リブに当たった打傷があったが、試験後に実施した He リーク試験の結果異常はなかった。
(写真(ロ)A 参 2-21)
 - (d) ボロン入り SUS 板には変形が生じたが、所定の位置から外れることはなかった。

表(ロ)A 参 2-1 最大発生加速度値

[単位：G]

試験項目	容器		模擬重量体		模擬燃料集合体				落下姿勢及び測定位置
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
落下試験Ⅰ 〔9 m 落下〕	垂直落下								
	水平落下								
	傾斜落下								
落下試験Ⅱ 〔1 m ターゲット落下〕	垂直落下								
	水平落下								

注) フィルタ条件：400Hz ローパスフィルタ使用

4.まとめ

本試験についてまとめると以下のとおり。

(1) 加速度について

容器に生じた最大加速度は9m 水平落下で G であった。また、模擬重量体及び模擬燃料集合体に生じた最大加速度は、9m 傾斜落下で G、9m 水平落下で G であった。

(2) 落下試験（I）9m 垂直落下のとき

落下面両側のフランジ部が落下の衝撃によりひずみ、mm のすき間ができた。また容器の全長がmm 縮まった。

(3) 落下試験（II）1m 垂直落下のとき

ターゲットによる変形の深さはmm であった。

(4) 落下試験（I）9m 傾斜落下のとき

上側ケースは均一にmm の変形を生じた。
弓型クランプが容器の内筒に衝突した。
収納物と内筒リブの衝突が衝突した。

(5) 落下試験（I）9m 水平落下のとき

上側ケースは均一にmm の変形を生じた。
容器側面の位置決めピンが8本中5本が根元から切断された。
弓型クランプが容器の内筒に衝突した。
収納物と内筒リブが衝突した。

(6) 落下試験（II）1m 水平落下のとき

ターゲットによる変形の深さはmm であった。

落下試験台の説明資料

1. 落下試験台

(1) 所有者

住所 :

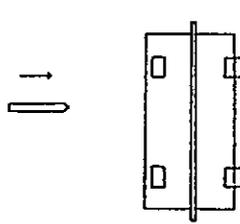
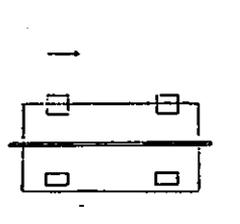
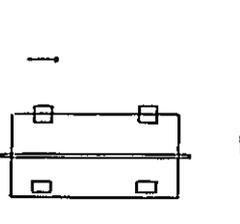
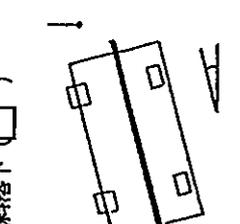
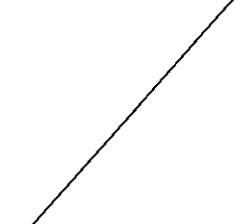
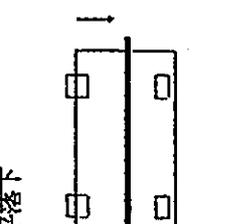
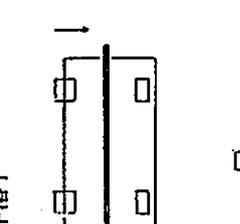
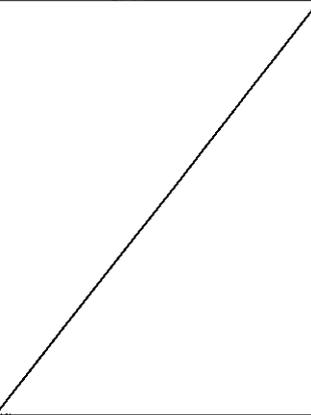
(2) 落下試験台の概要

基準(1973年安全輸送規則)		当該落下試験台
IAEA (708)	試験台は平らな面であって、供試物の衝突の際の変位又は、変形に対する抵抗の増加により供試物の破損を著しく増大するものでないこと。	落下試験台の上面は圧延仕上鋼を用いており、平面度は□mm以上の基準で製作しているため、供試物の破損を増大させるものではない。
ADVISORY (701)	(1) 供試物の 10 倍以上の質量のコンクリートブロック上に鋼板を置いたもの。	(1) 鋼板下のコンクリートは、□×□×□m のブロックで、約□Ton である。 このため、供試物は□Ton まで許容される。
	(2) 鋼板は 1.25cm 以上の厚さであること。	(2) 使用鋼板は、□cm である。
	(3) コンクリートに密着するように、ウェットフローであること。	(3) コンクリートと鋼板の間は無収縮モルタル (厚さ□mm) を注入して密着させている。
	(4) ターゲットはどの側においても、供試物より 500mm 以上であること。	(4) 鋼板寸法は、□m であり、供試物は最大寸法□m まで許容される。

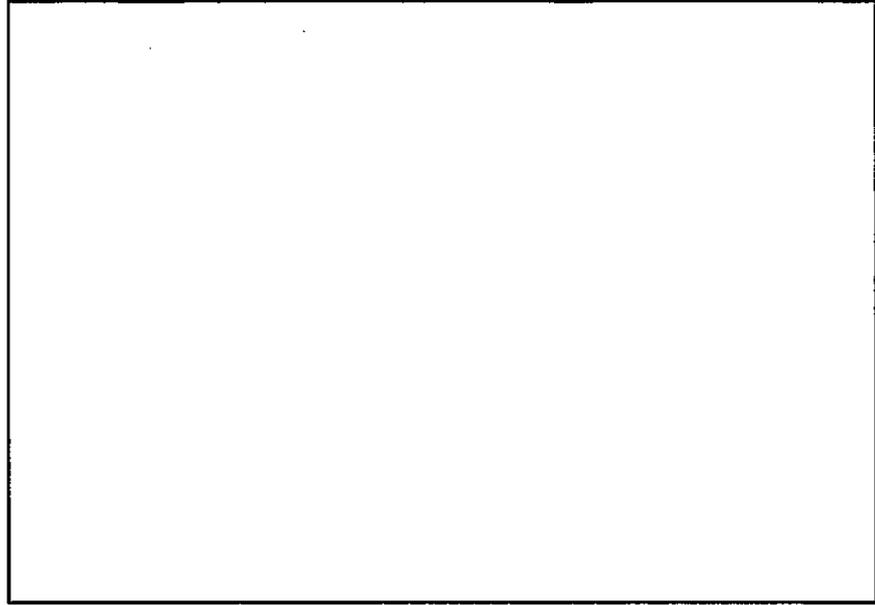


落下試験台設置断面図 (寸法 : m)

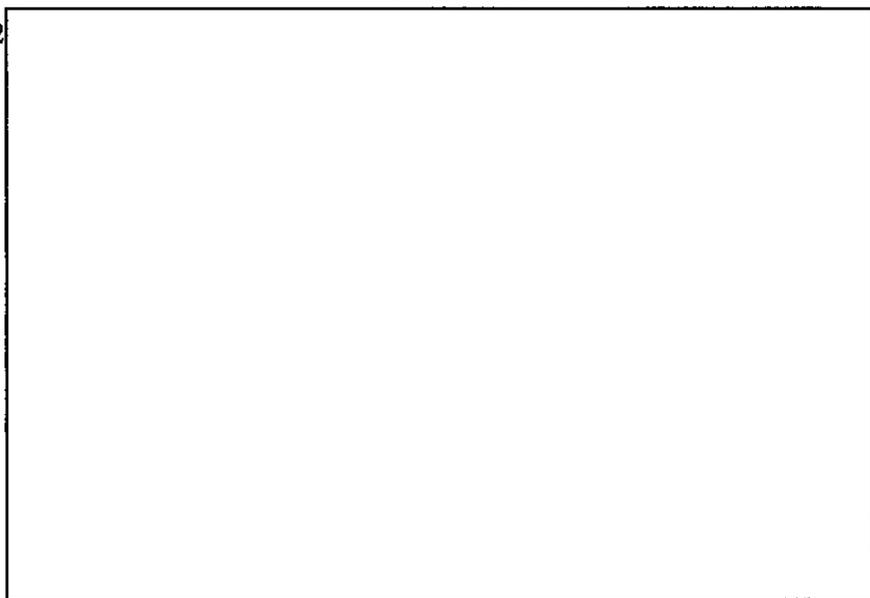
落下試験実施順序

試験の種類	貫通試験	落下試験 (I) 9m 落下	落下試験 (II) 1m ターゲット落下	落下試験 (I) 9m 落下
1号機	<p>①</p> 	<p>②垂直落下</p> 	<p>③垂直落下</p> 	<p>④傾斜落下 (□・○)</p> 
2号機		<p>⑤水平落下</p> 	<p>⑥水平落下</p> 	
撮影内容	変形量 写真撮影	加速度 変形量 ビデオ撮影 写真撮影	加速度 変形量 ビデオ撮影 写真撮影	加速度 変形量 ビデオ撮影 写真撮影

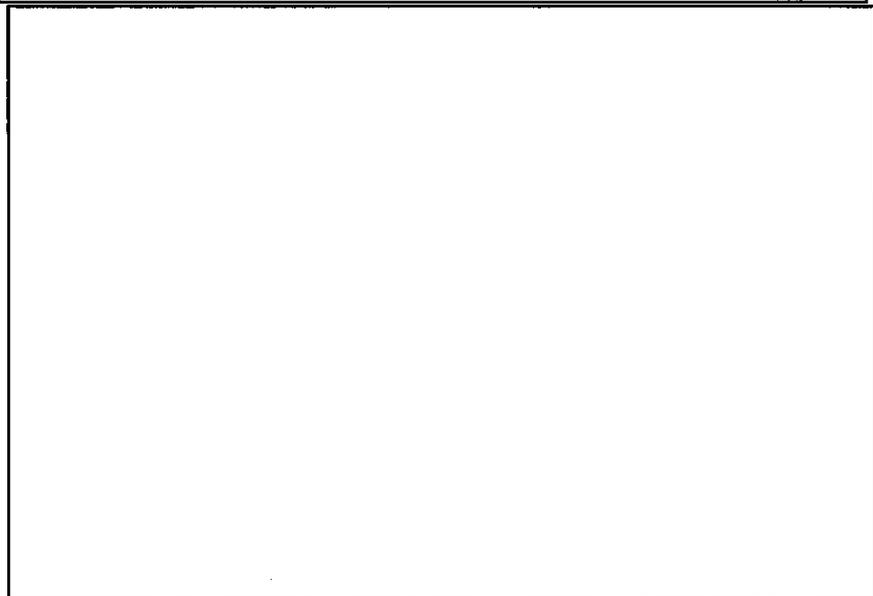
写真(口)A 参 2-1



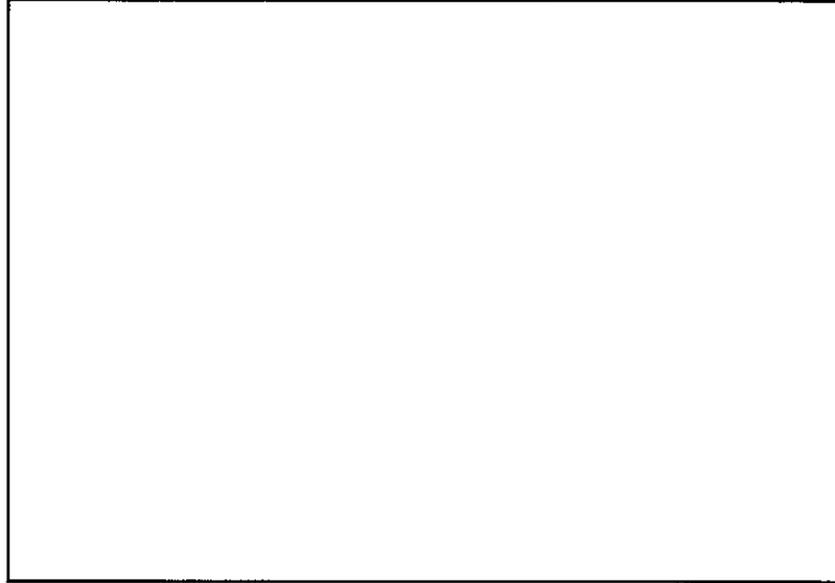
写真(口)A 参 2-2



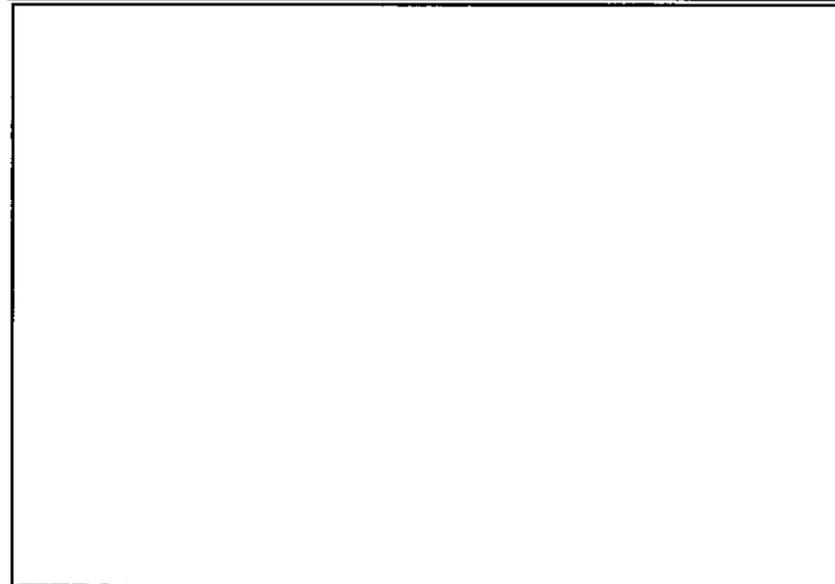
写真(口)A 参 2-3



写真(口)A 参 2-4



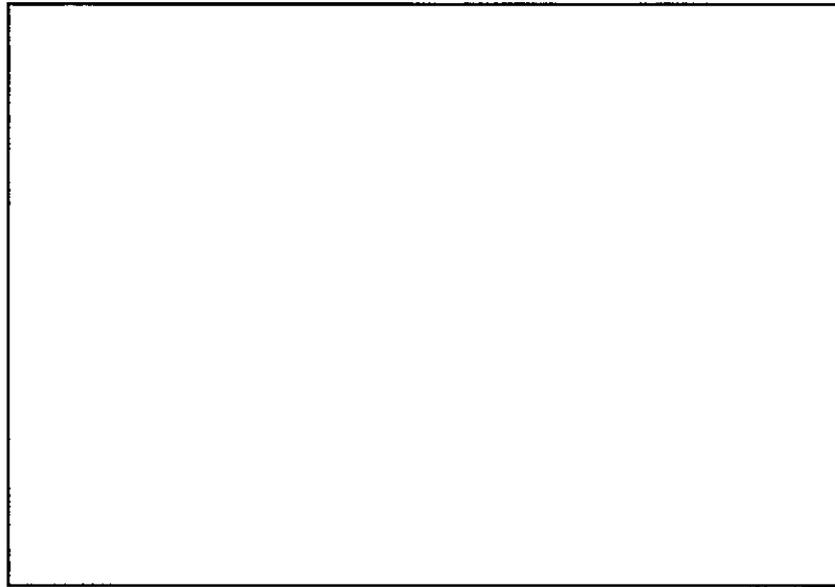
写真(口)A 参 2-5



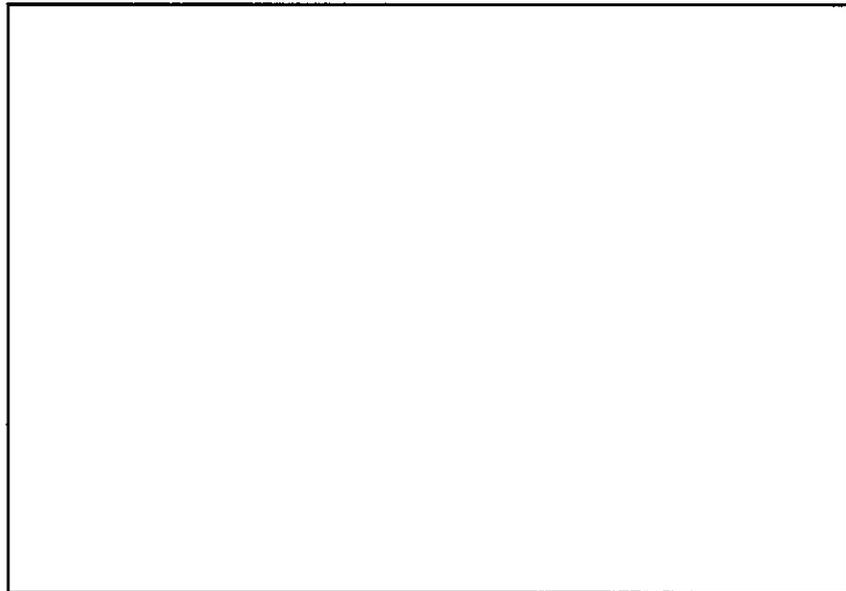
写真(口)A 参 2-6



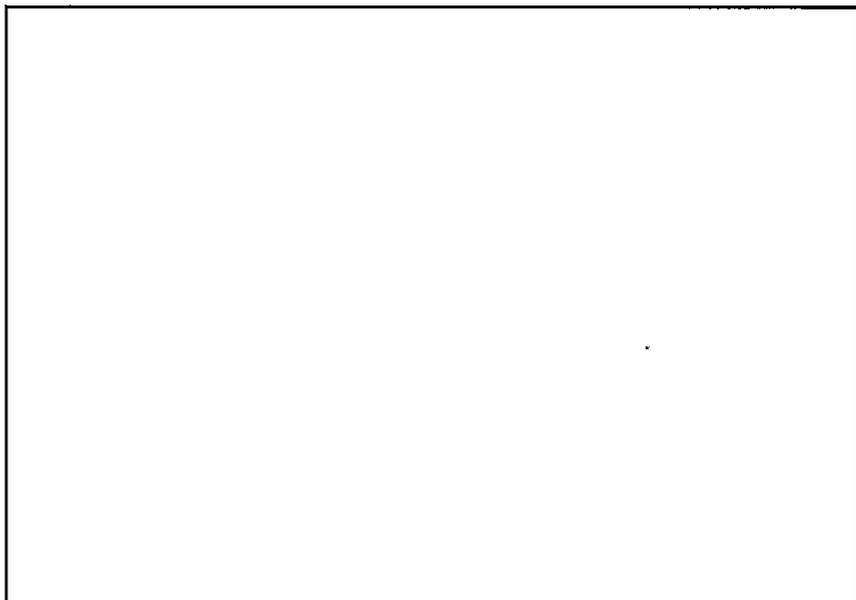
写真(口)A 参 2-7



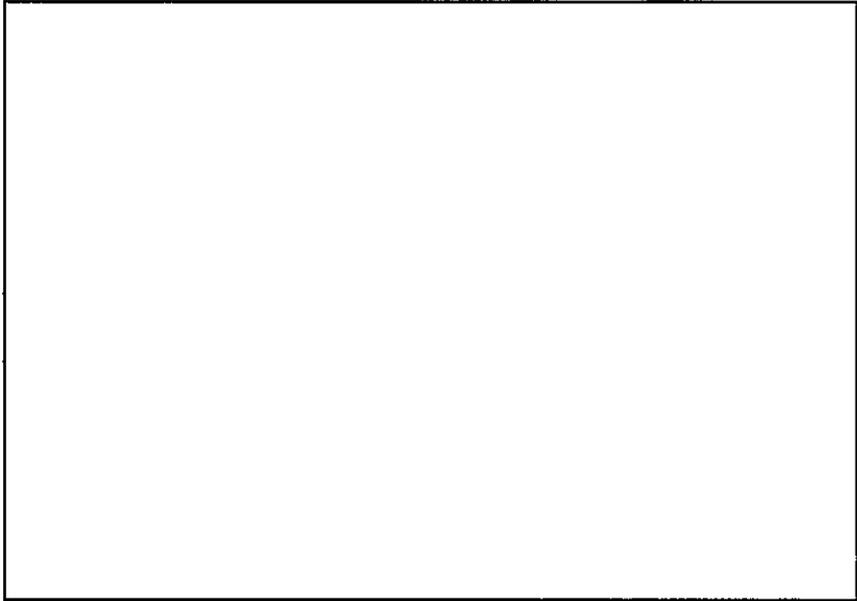
写真(口)A 参 2-8



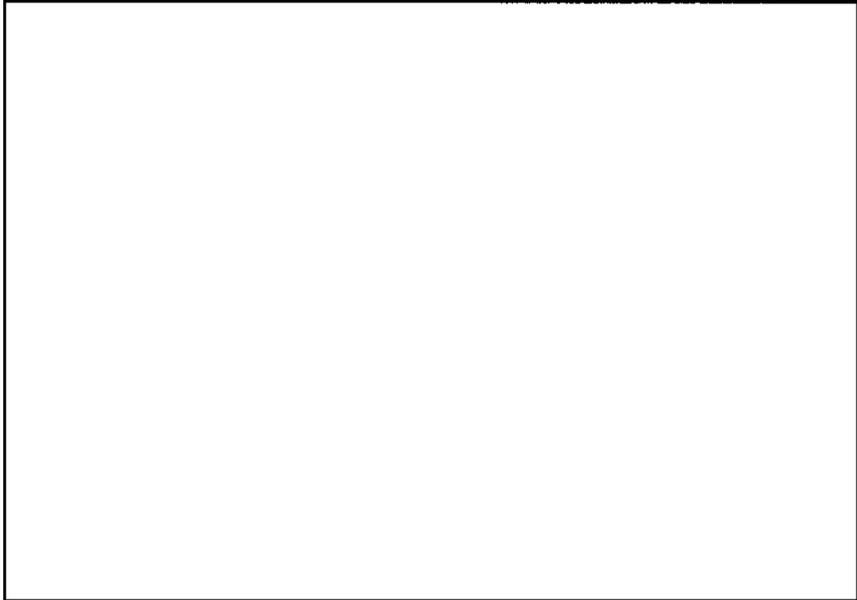
写真(口)A 参 2-9



写真(口)A 参 2- 10



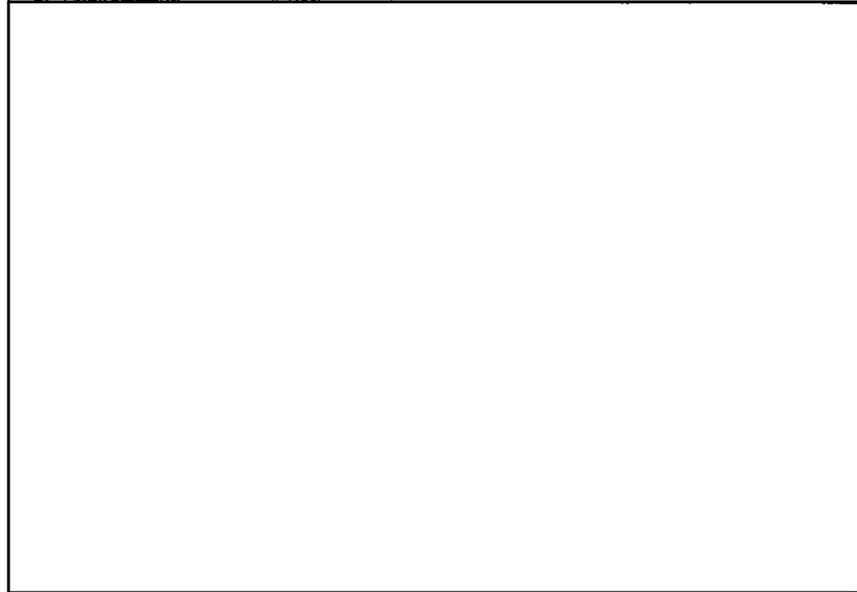
写真(口)A 参 2- 11



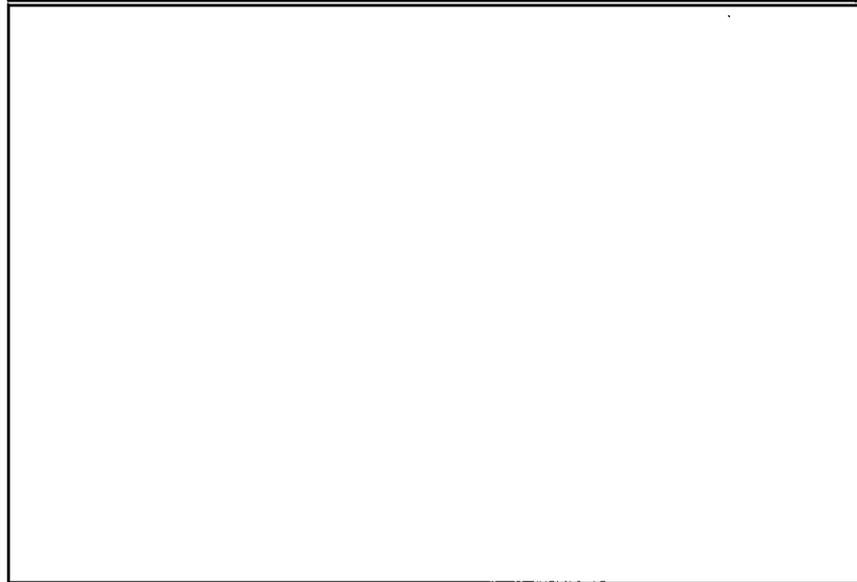
写真(口)A 参 2- 12



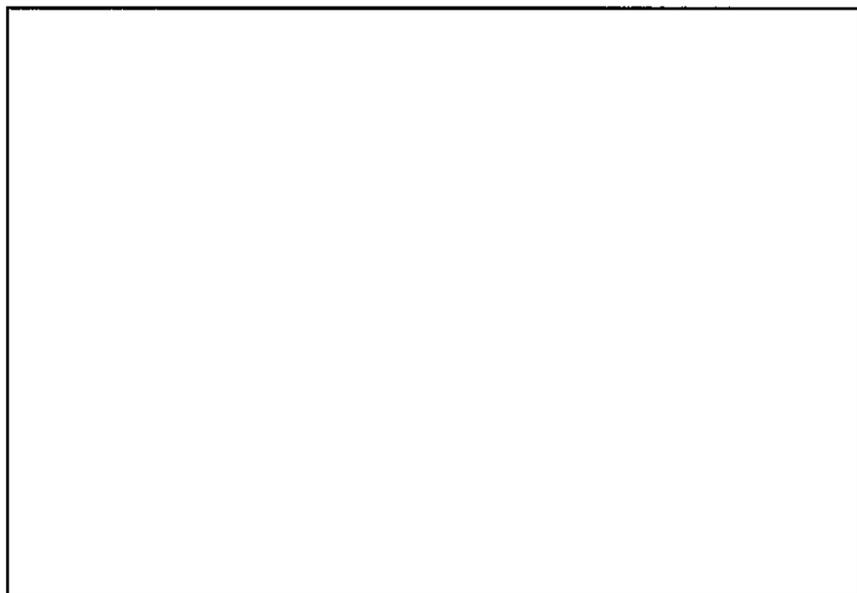
写真(口)A 参 2- 13



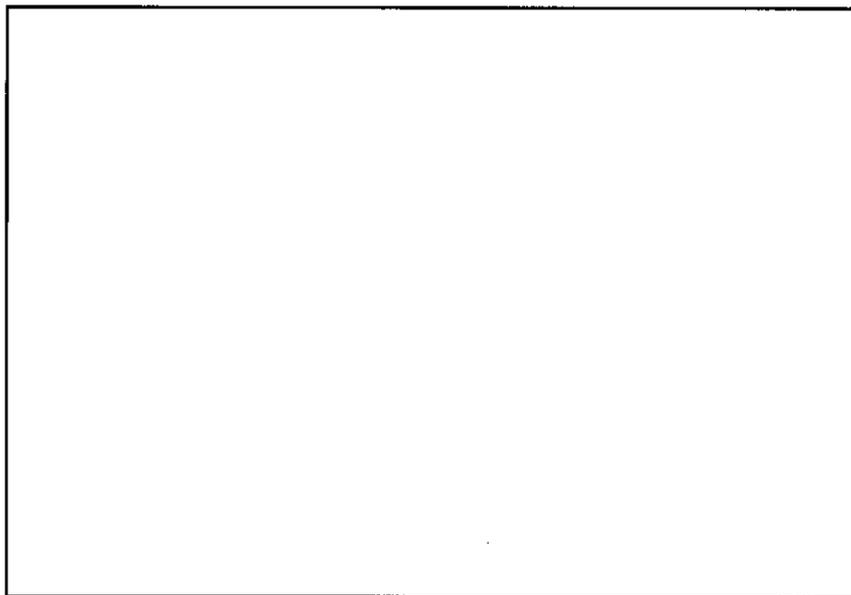
写真(口)A 参 2- 14



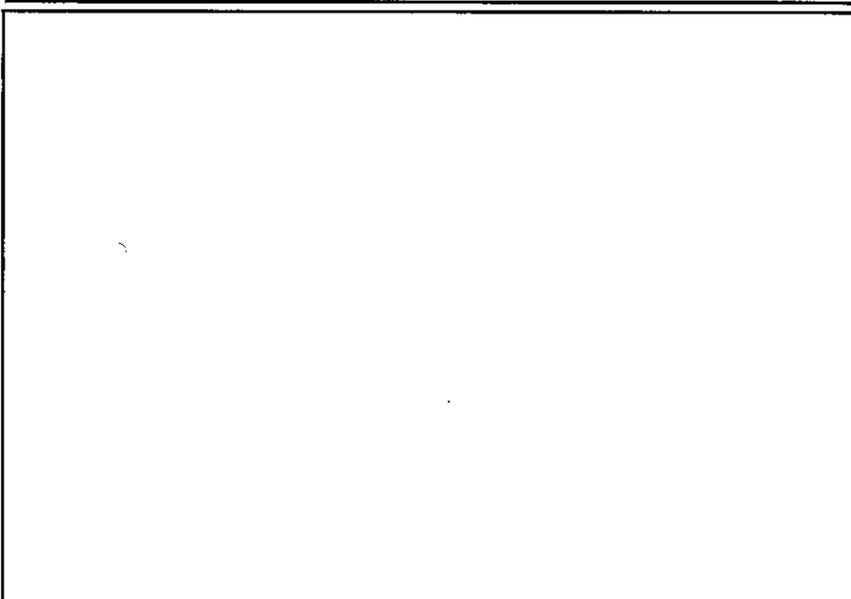
写真(口)A 参 2- 15



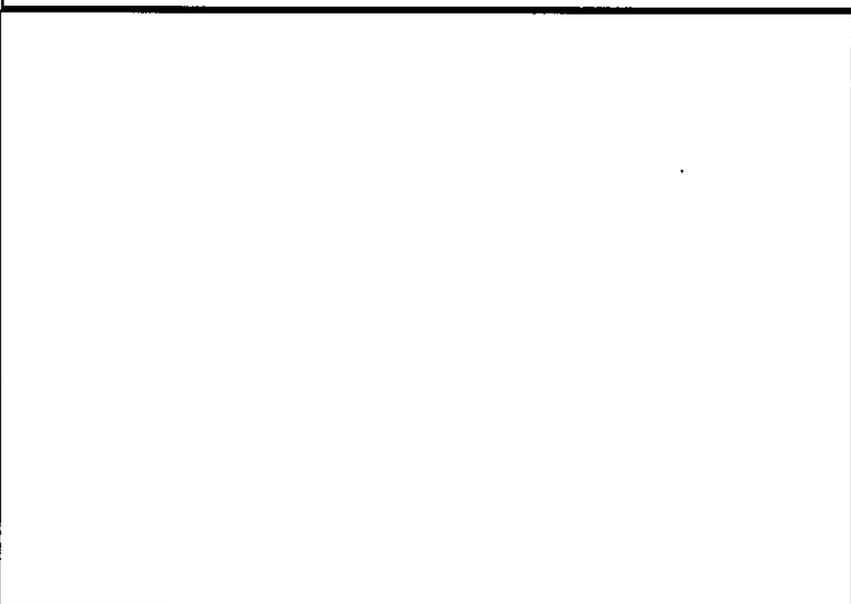
写真(口)A 参 2- 16



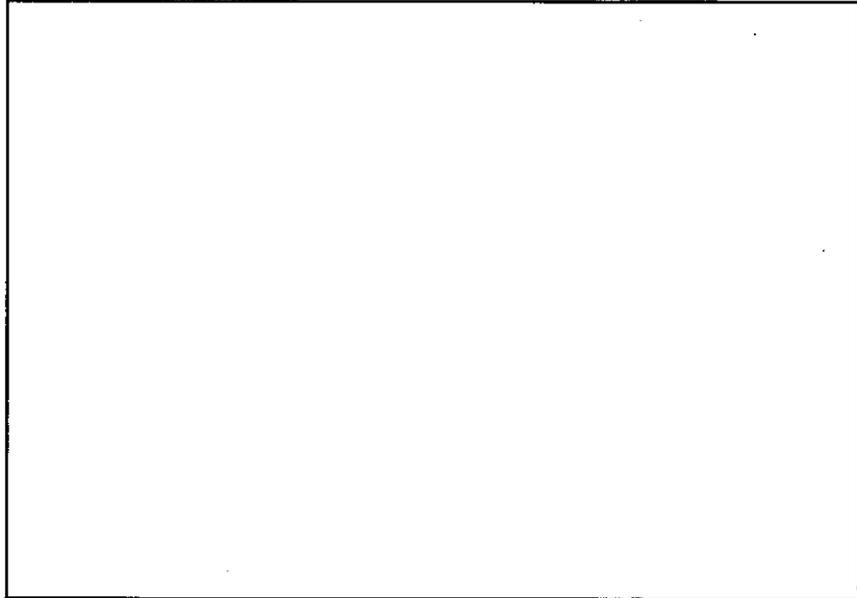
写真(口)A 参 2- 17



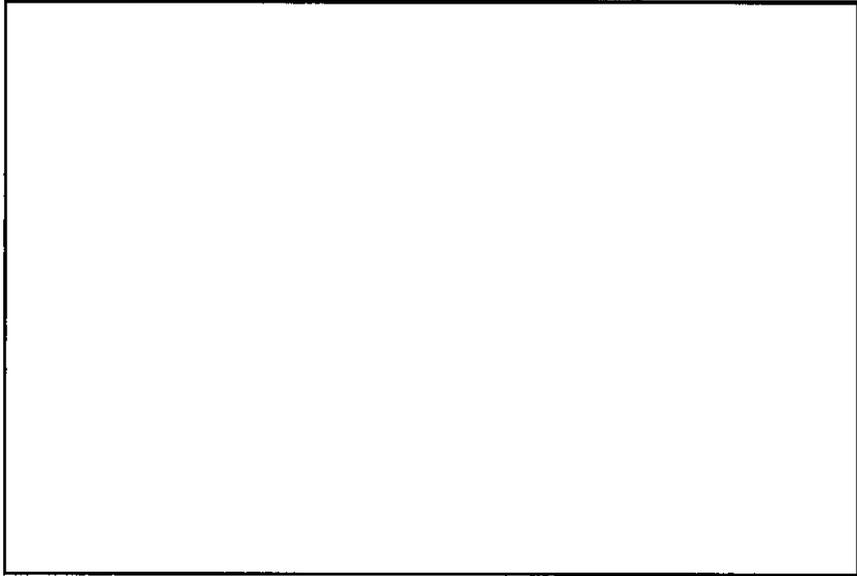
写真(口)A 参 2- 18



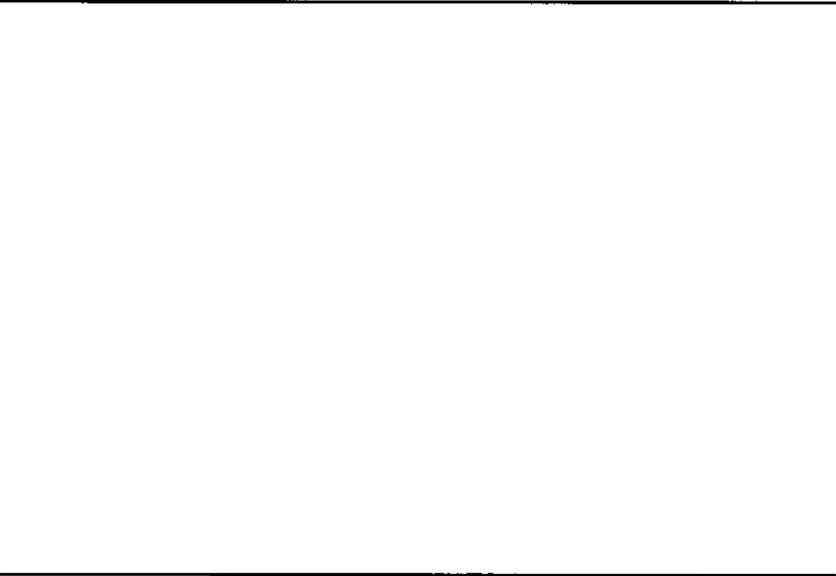
写真(口)A 参 2-19



写真(口)A 参 2-20



写真(口)A 参 2-21



参考資料(ロ)-A.3

NFI-V 輸送容器 1/2 縮尺モデル落下試験結果報告

目 次

1. はじめに
2. 試 験
 - 2.1 試験場所及び試験日時
 - 2.2 試験体
 - 2.3 試験用機材
 - 2.4 試験方法
3. 試験結果
 - 3.1 最大加速度値
 - 3.2 落下試験後の状況
4. まとめ

添 付 資 料

- 添付 1 : 落下試験台の説明
- 添付 2 : 落下試験実施順序
- 添付 3 : 落下試験写真集

1.はじめに

本報告書は、1/2 縮尺モデルを対象に実施した落下試験の状況及び試験後の容器の検査結果をまとめたものである。本試験に用いた 1/2 縮尺モデルは、事前に実施した予備落下試験の結果に基づいて、一部設計変更を実施したものであり、設計変更箇所の効果確認と特別の試験条件における輸送物の挙動を調べるために落下試験を実施した。

2. 試験

原型容器を用いた落下試験及び耐火試験の結果を受け、設計の改善検討を行う。表(ロ)A 参 3-1 に主な設計変更箇所を示す。今回の落下試験では、設計変更箇所の効果の確認のため、1/2 スケールモデル製作して試験を実施した。

2.1 試験場所及び試験日時

(1) 試験場所

(2) 試験日時

準備等を含め、 から まで実施した。

2.2 試験体

落下試験 I, II に用いた輸送物については以下のとおり。

- (1) 試験に用いた容器外側ケースの寸法は、実際の輸送物の約 1/2 になるようにし、材料は最終仕様と同じものを用いた。この結果、重量はほぼ になった。
- (2) 収納物は、容器内に燃料集合体を固定するストロングバックと 2 体の燃料集合体の総重量の に等しい重量模擬体 1 体とした。
- (3) 収納物の外観については弓型クランプのみを模擬させることとした。収納物は、4 個のショックマウントにより容器内部に保持される。
- (4) 容器の胴部と端部に貫通孔を設け、その孔を通して容器内部に取付けた加速度計の配線を取出した。また、胴部に吊下げ用の穴を追加している。
- (5) フランジ締付けボルトは実寸の M16 の 1/2 スケールの M8 のものを用いた。
- (6) スタッキングブラケットの長さは実際の輸送容器では、 mm であるが、試験容器では、 mm とした。

2.3 試験用機材

(1) 落下試験用 1/2 スケール容器 1 台

実寸モデルの輸送容器の詳細は 1.1 輸送物概要及び 2.2 試験体に示したとおり。

(2) 収納物

重量模擬体：1 体

ストロングバックと燃料集合体 2 体の総重量の□の重量をもつ重量模擬体である。この模擬体は容器内部にショックマウント 4 個を用いて保持される。

(3) 落下試験台

□試験台を使用した。仕様を添付 1 に示す。

(4) クレーン

□トンクレーン車を使用した。

(5) 切離し用吊り具

□の容量□トンの吊具を使用した。

(6) 加速度計

□の□を使用した。

取付位置と測定方向を表(ロ)A 参 3-2 及び図(ロ)A 参 3-1 に示す。

2.4 試験方法

試験は添付 2 に示すように計 8 回の落下試験を行った。容器を吊上げる際にはシャックル、ワイヤ等を使用し、容器落下後にシャックル等が容器上に落下しないように考慮した。

2.4.1 9m 落下

(1) 水平落下（上側ケース下向き）

図(ロ)A 参 3-2 に示すように、上側ケース下向きとして、水平に落下させた。姿勢の制御には脚部の吊穴（4 ケ所）を用いた。

(2) 水平落下（フランジ部下向き）

図(ロ)A 参 3-3 に示すようにフランジ部を下向きにして、水平に落下させた。

- (3) 垂直落下（ 下部ノズル側下向き ）

図(ロ)A 参 3-4 に燃料下部ノズル側を下にして落下させた。

- (4) 傾斜落下（ 上部ノズル側下向き ）

図(ロ)A 参 3-5 に示すように下側ケース上部ノズル側を下向きとして落下させた。

姿勢の制御にはスタッキングブラケットの吊穴（4ヶ所）を用いて□°の傾斜を保った状態から落下させた。

2.4.2 1m ターゲット落下

- (1) 水平落下（上側ケース下向き）

3.4.1 の(1)と同様にして、水平に落下させるが、貫通治具が上側ケース中央部に当たるように落下させた。

- (2) 水平落下（フランジ部下向き）

3.4.1 の(2)と同様にして、水平に落下させるが、貫通治具がフランジと外筒の溶接部に当たるように落下させた。

- (3) 傾斜落下

3.4.1 の(4)と同様ではあるが、今度は下側ケース下部ノズル側を下向きとして落下させて貫通治具がスキッドの内側に当るようにした。

- (4) 垂直落下

3.4.1 の(3)と同様に下部ノズル側を下向きとして落下させて貫通治具を上側ケースに当てる場合と下側ケースに当てる場合の2回を行った。

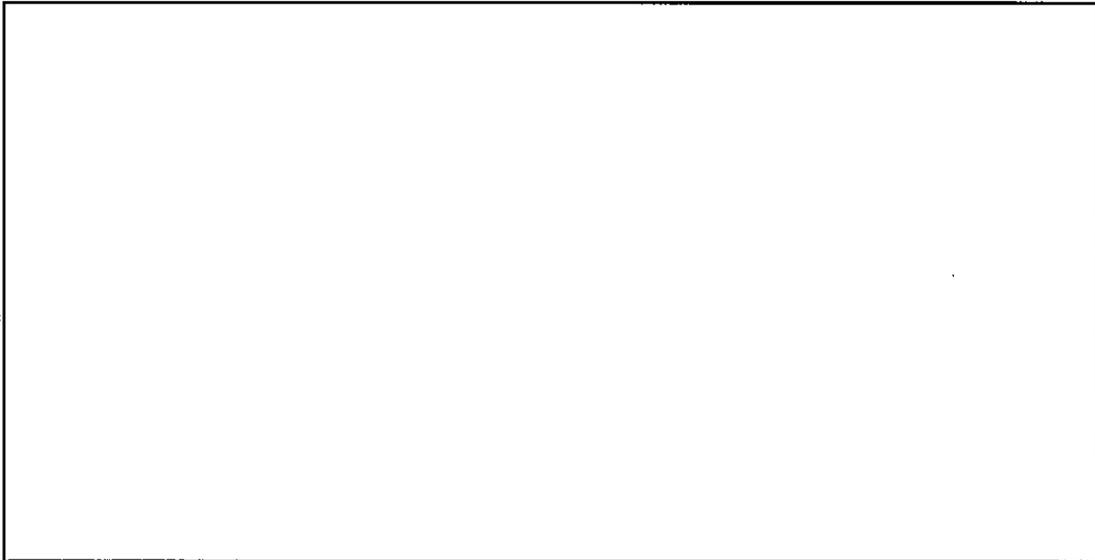
表(ロ)A 参 3-1 NFI-V型輸送容器 原型容器からの設計変更の主内容

変更の内容	設計変更の目的	有効性の評価方法
板厚フラット構造のフランジを薄板曲げ、段付き構造に変更する。	熱変形による応力が、直接ボルトに作用しないようにする。	解析で評価する。 1/2 スケールモデルの耐火試験で評価する。
緩衝体の変更 バルサ → SUS パイプ層構造	熱分解ガス発生による内圧増加防止。	1/2 スケールモデルの落下試験でバルサと同程度の有効性を評価する。ガス発生しないことは確認不要。
フランジ締め付けボルト、ナット 寸法 M12 → M16 ボルト材質 SCM435H (変わらず) ナット材質 SUS304 → SUS310S 個数 容器端部で計 4 個増加	通常時及び耐火試験時(高温時)の強度増加。	1/2 スケールモデルの落下試験及び耐火試験で評価を行う。
フランジコーナーを□mm カットする。	垂直落下時の端部フランジが開口するのを防ぐ。	1/2 スケールモデルの落下試験で評価する。
スタッキングブラケットの短尺化 (長さ□mm とする。)	リブの局所変形による燃料集合体との衝突防止。	1/2 スケールモデルの落下試験で評価する。
内筒と外筒の間にパイプ式緩衝体を入れる。	加速度の低減。	1/2 スケールモデルの落下試験で評価する。

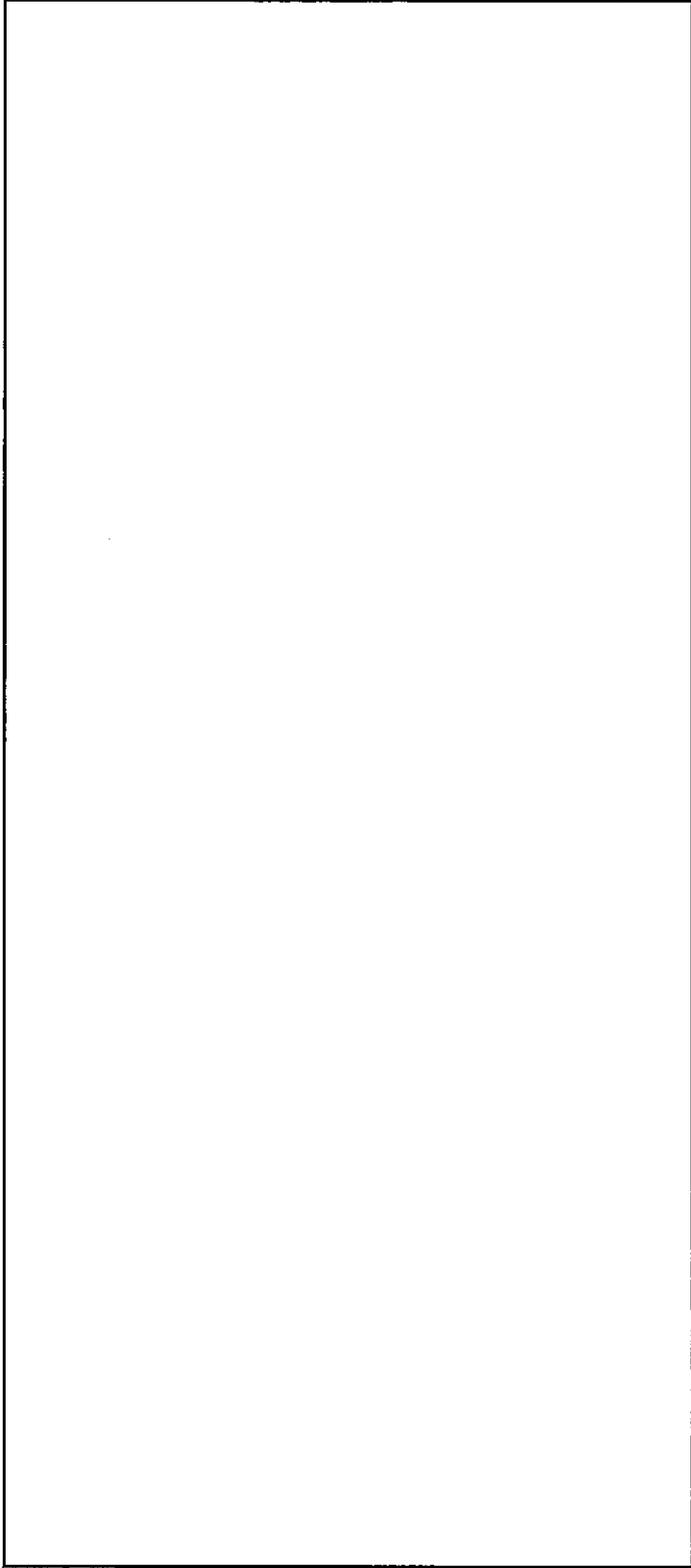
表(ロ)A 参 3-2 加速度計の取付位置と測定方向

取付箇所 試験名称	容 器		重量模擬体		
	上部ノズル側	中央部	上部ノズル側	中央部	下部ノズル側
	P1	P2	P3	P4	P5
上部ケース水平	Y	Y	—	Y	Y
フランジ部水平	X	X	—	X	X
垂 直	Z	Z	Z	Z	—
傾 斜	Y	Y	—	Y	Y

注) 表中、X、Y、Zは測定方向を示し、供試体との対応は、図(ロ)A 参 3-1 参照。

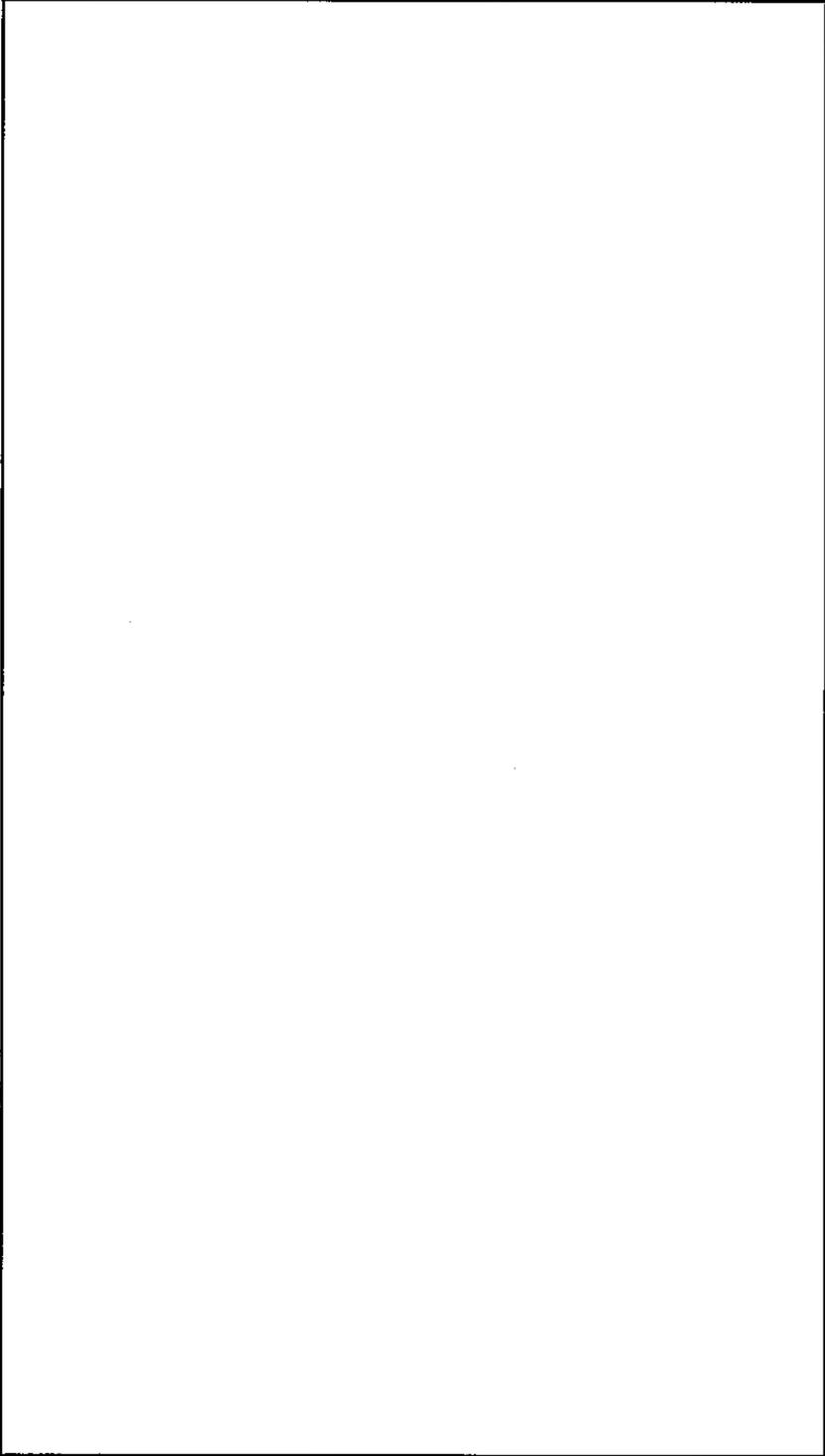


図(ロ)A 参 3-1 加速度測定箇所



図(ロ)A 参3-3 水平落下 (フランジ部下向き)

図(ロ)A 参3-2 水平落下 (上側ケース下向き)



図(口)A 参 3-5 傾斜落下

図(口)A 参 3-4 垂直落下

3. 試験結果

3.1 最大加速度

各落下試験において容器本体と、内部の重量模擬体の測定位置により発生した最大加速度を、表(ロ)A 参 3-3に示す。最大加速度は、金属どうしの衝突時に発生する高周波ノイズをカットするために Hz のローパスフィルタをかけて求めた。

3.2 落下試験後の状況

落下試験中には、カメラ及び8ミリビデオ等を用いて撮影を行った。その写真を最後にまとめた。以下にその写真を参考にしながら説明する。

落下試験前の試験容器及び容器内部の収納物をそれぞれ写真(ロ)A 参 3-1及び写真(ロ)A 参 3-2に示す。

(1) 9m 水平落下（上側ケース下向き）

- (a) 上側ケースの衝突面が全体に均一に mm 変形した。(写真(ロ)A 参 3-3)
- (b) 弓型クランプを模擬した部分と上側ケース、あるいは模擬重量体と上側ケースのリブが衝突していた。(写真(ロ)A 参 3-4 及び写真(ロ)A 参 3-5)

(2) 9m 水平落下（フランジ部下向き）

- (a) 落下面のフランジが容器内部側へ、くいこむように変形していた。(写真(ロ)A 参 3-6)
- (b) 下部ノズル側の容器端面、ナットがはずれた。(写真(ロ)A 参 3-7)
落下面と反対側のフランジ部でボルトゆるみ、スペーサーのウレタンゴムがはみだしていた。(写真(ロ)A 参 3-8 及び写真(ロ)A 参 3-9)

(3) 9m 垂直落下

- (a) 落下面ボルトゆるみが発生し、そのうち1本は外れた。(写真(ロ)A 参 3-10)
- (b) 落下面のフランジが下部ケース側に曲がった。

(4) 容器の内部検査

- (a) 容器端部のパイプ緩衝体は収納物の衝突により変形した。(写真(ロ)A 参 3-11)
- (b) ショックマウントが1個はずれた。(写真(ロ)A 参 3-12)
- (c) フランジ部を下にした落下の際に、収納物が容器内部に当たった跡がある。(写真(ロ)A 参 3-13)

(5) 9m 傾斜落下

- (a) 燃料下部ノズル側の容器端面において外筒が破れた。また、脚部も破損した。白い粉は容器の外筒が破けたために断熱材が飛び出したもの。

(写真(ロ)A 参 3- 14 及び写真(ロ)A 参 3- 15)

(6) 容器の内部検査

- (a) 燃料上部ノズル側で容器底部と収納物が当たった跡がある。

(写真(ロ)A 参 3- 16)

(7) 1m 落下試験全体を通じて

- (a) それぞれの落下において、外筒が mm から mm 程度の変形を生じた。

水平落下（上側ケース下向き） - - - - - (写真(ロ)A 参 3- 17)

水平落下（フランジ部下向き） - - - - - (写真(ロ)A 参 3- 18)

傾斜落下（上部ノズル側下向き） - - - - - (写真(ロ)A 参 3- 19)

垂直落下（下部ノズル側下向き） - - - - - (写真(ロ)A 参 3- 20)

- (b) フランジ部を下向きにした落下の際に、内筒と重量模擬体が衝突していた。

(写真(ロ)A 参 3- 21)

表(ロ)A 参 3-3 最大発生加速度値

試験項目	最大発生加速度 (G)				落下姿勢及び測定位置
	模擬重量体		輸送容器		
(1)上側ケース部 水平落下	P 1 Y	P 2 Y (*)	P 4 Y	P 5 Y (*)	
(2)フランジ面 水平落下	P 1 X	P 2 X	P 4 X	P 5 X	
(3)下部ノズル側 垂直落下	P 1 Z	P 2 Z	P 4 Z	P 3 Z	
(4)上部ノズル側 傾斜落下	P 1 Y	P 2 Y	P 4 Y	P 5 Y (*)	

4. まとめ

(1) 9m 水平落下

1/2 スケールの試験容器を用いた場合には、縮尺則により、実寸モデルに比べて加速度が倍になるため、今回の測定結果から実寸モデルの場合を推定すると、～Gの加速度が生じると考える。また、スタッキングブラケットは、実際の輸送容器のそれよりも長く落下の衝撃がスタッキングブラケットを通じてケースのリップに伝わりリップの変形を大きくしたと考えられ、短尺化を必要とする。

(2) 9m 水平落下（フランジ部下向き）

容器の変形は小さく、また局部的であったが測定された加速度は上側ケース下向きの場合と比較して約倍となっている。

(3) 9m 垂直落下

1/2 スケールの試験容器を用いた落下試験から予想される実寸モデルの際の加速度は～Gである。この値は、に行った原型容器落下試験での値(～G)とほぼ同じである。

パイプ層構造の緩衝体使用について何ら問題はないと考える。

(4) 9m 傾斜落下

生じた加速度については小さく何ら問題はない。しかしながら内部重量体が下部ケースに衝突したために下部ケースの外筒に一部割れは生じた。この点については、今回の内部構造は実際の容器と異なることやショックマウントも4個と少なかったことが原因と考えられ、実寸モデルでは問題ないと考える。

(5) 1m 落下試験全体を通じて

各々の試験において容器外筒に割れは生じず、問題はない。

落下試験第の説明資料

1. 落下試験台

(1) 所有者

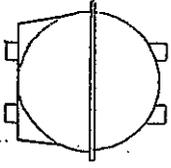
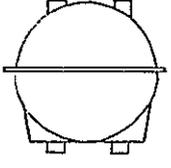
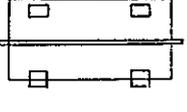
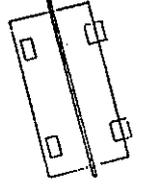
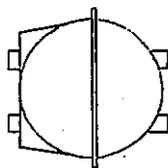
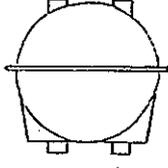
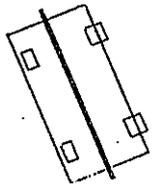
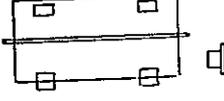
住所 :

(2) 落下試験台の概要

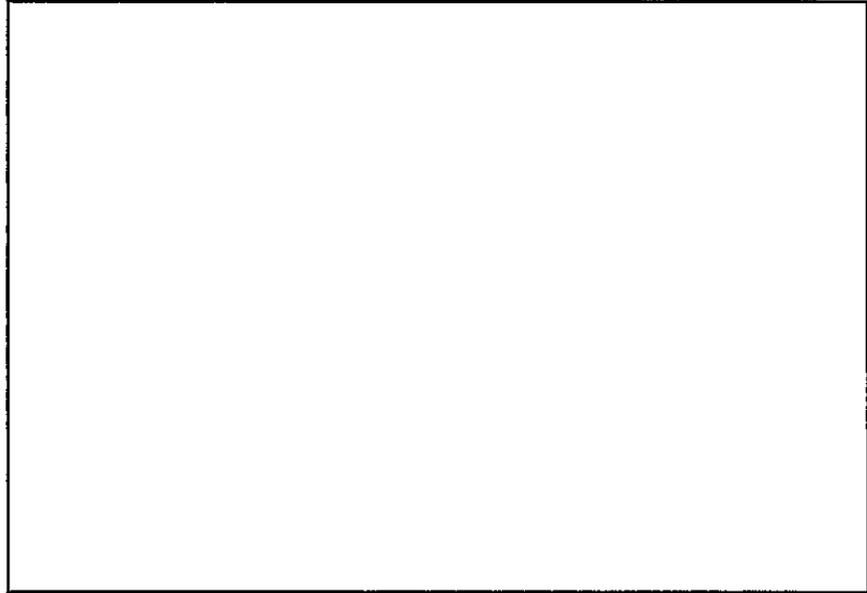
基準 (1973 年安全輸送規則)		当該落下試験台
IAEA (708)	試験台は平らな面であって、供試物の衝突の際の変位又は、変形に対する抵抗の増加により供試物の破損を著しく増大するものではないこと。	落下試験台の上面は圧延仕上網を用いており、平面度は <input type="text"/> mm 以上の基準で製作しているため、供試物の破損を増大させるものではない。
ADVISERY (701)	(1) 供試物の 10 倍以上の質量のコンクリートブロック上に鋼板を置いたもの。	(1) 鋼板下のコンクリートは、 <input type="text"/> × <input type="text"/> × <input type="text"/> m のブロックで、約 <input type="text"/> Ton である。 このため、供試物は、 <input type="text"/> Ton まで許容される。
	(2) 鋼板は 1.25cm 以上の厚さであること。	(2) 使用鋼板は、 <input type="text"/> cm である。
	(3) コンクリートに密着するように、ウェットフローであること。	(3) コンクリートと鋼板の間は無収縮モルタル(厚さ <input type="text"/> mm)を注入して密着させている。
	(4) ターゲットはどの側においても、供試物より 500mm 以上であること。	(4) 鋼板寸法は、 <input type="text"/> × <input type="text"/> m であり、供試物は最大寸法 <input type="text"/> m まで許容される。

落下試験台設置断面図 (寸法 : × mm)

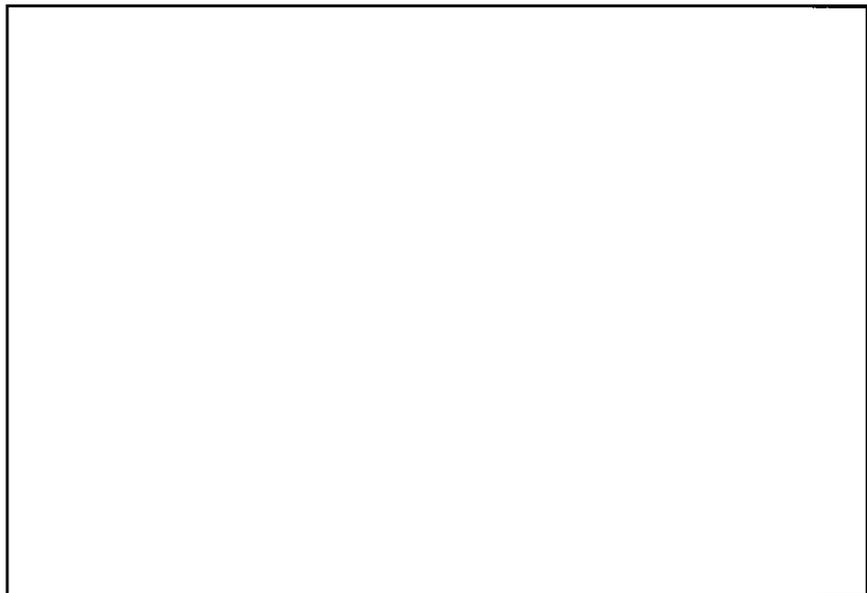
落下試験実施順序

試験の種類	9m水平落下 (上側ケース下向き)	9m水平落下 (フランジ部下向き)	9m垂直落下 (下部ノズル側下向き)	9m傾斜落下 (上側ケース下向きで 上部ノズル側接地)
状態図	①落下後蓋あけ 	② 	③落下後蓋あけ 	④傾斜角 (11.3°) 落下後蓋あけ 
試験の種類	1m水平タゲット落下 (上側ケース下向き)	1m水平タゲット落下 (フランジ部下向き)	1m傾斜タゲット落下 (下部ノズル側内側)	1m垂直タゲット落下 (上側あるいは下部ケー スを下向き)
状態図	⑤ 	⑥ 	⑦傾斜角 (13°) 	⑧落下後蓋あけ 
撮影内容	加速度 変形 ビデオ撮影 写真撮影	加速度 変形 ビデオ撮影 写真撮影	加速度 変形 ビデオ撮影 写真撮影	加速度 変形 ビデオ撮影 写真撮影

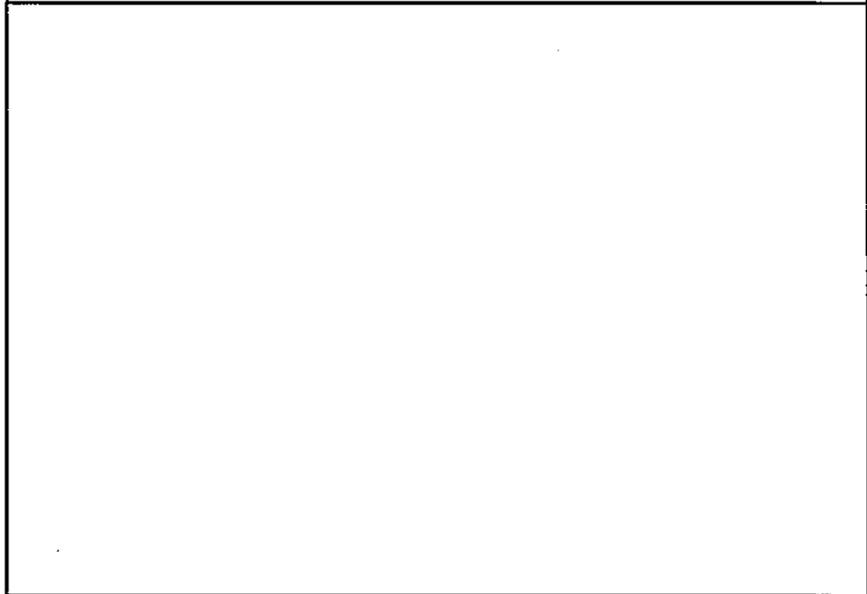
写真(口)A 参 3-1



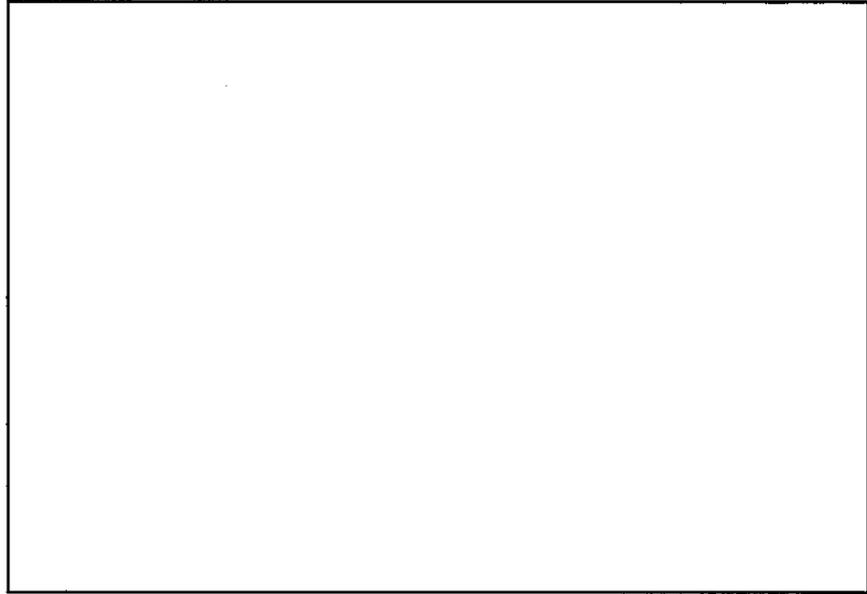
写真(口)A 参 3-2



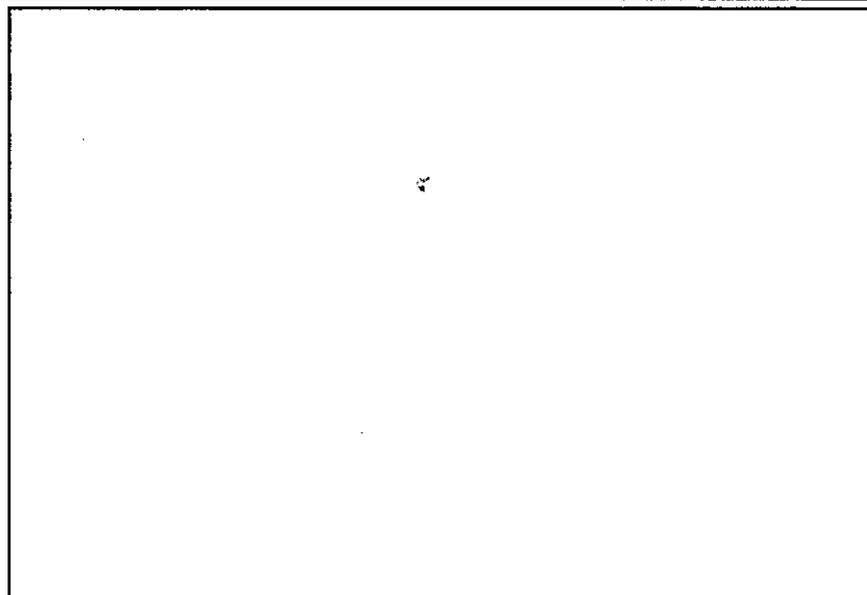
写真(口)A 参 3-3



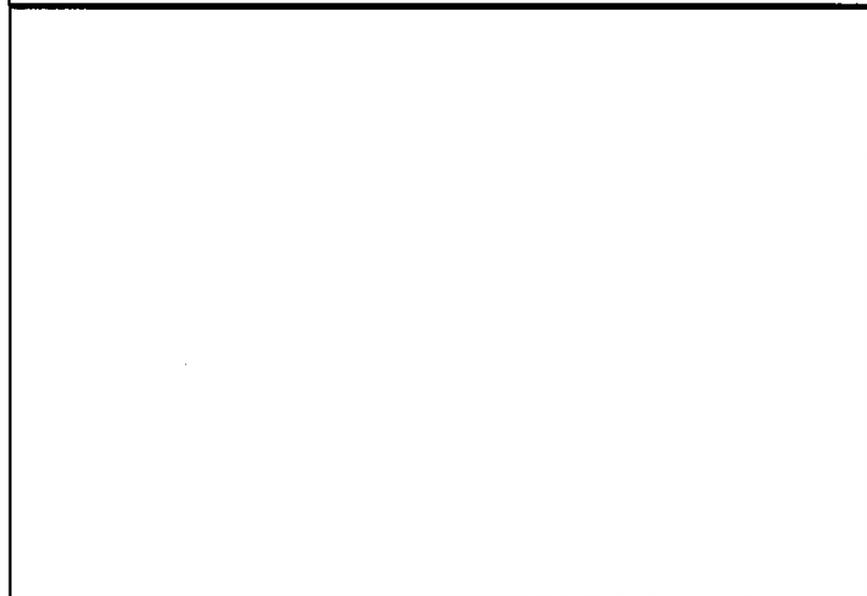
写真(口)A参3-4



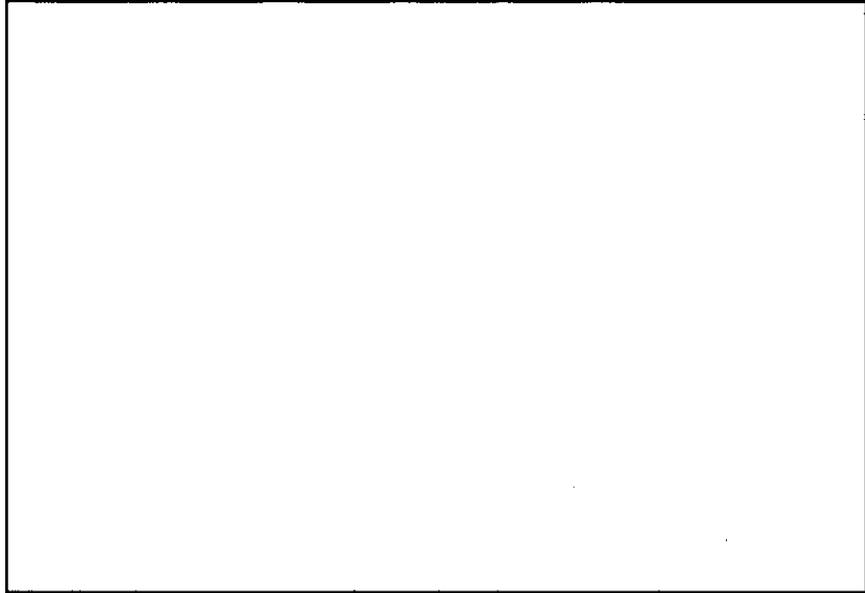
写真(口)A参3-5



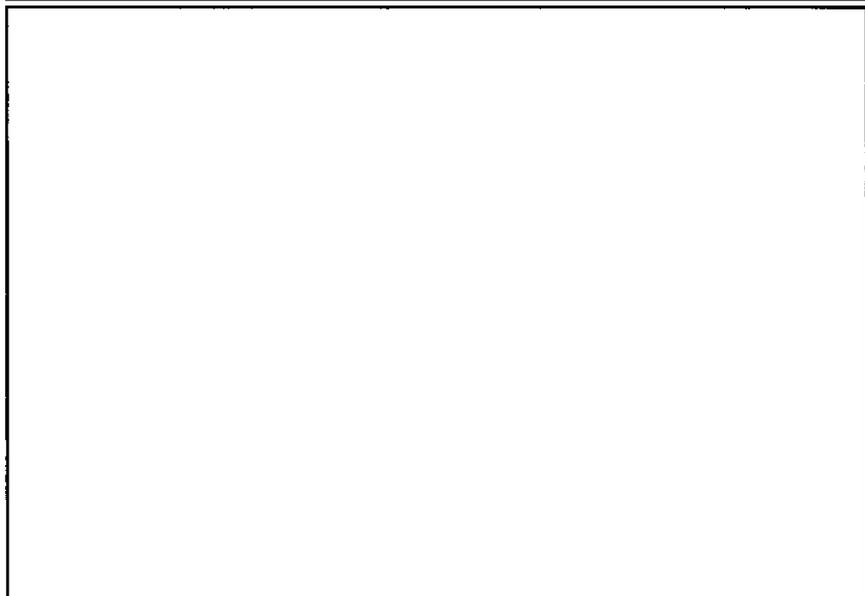
写真(口)A参3-6



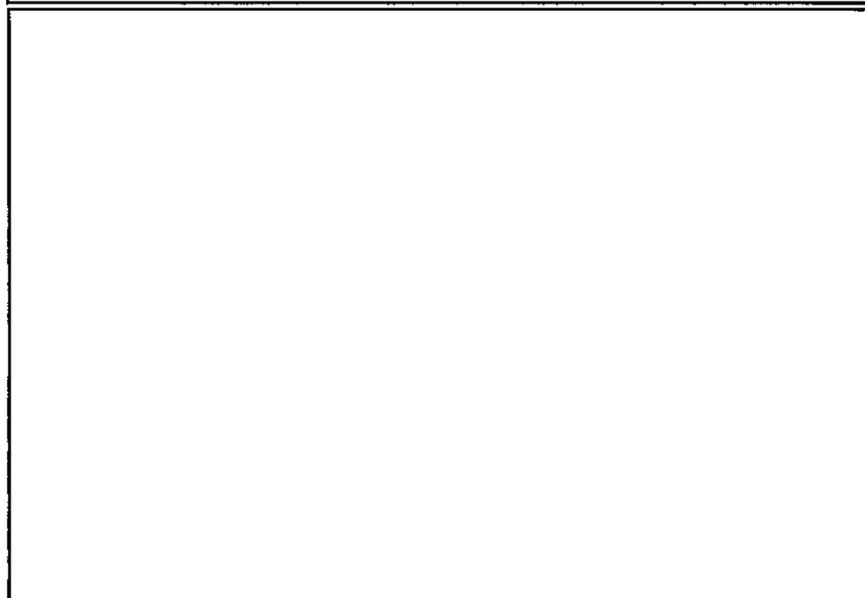
写真(口)A 参 3-7



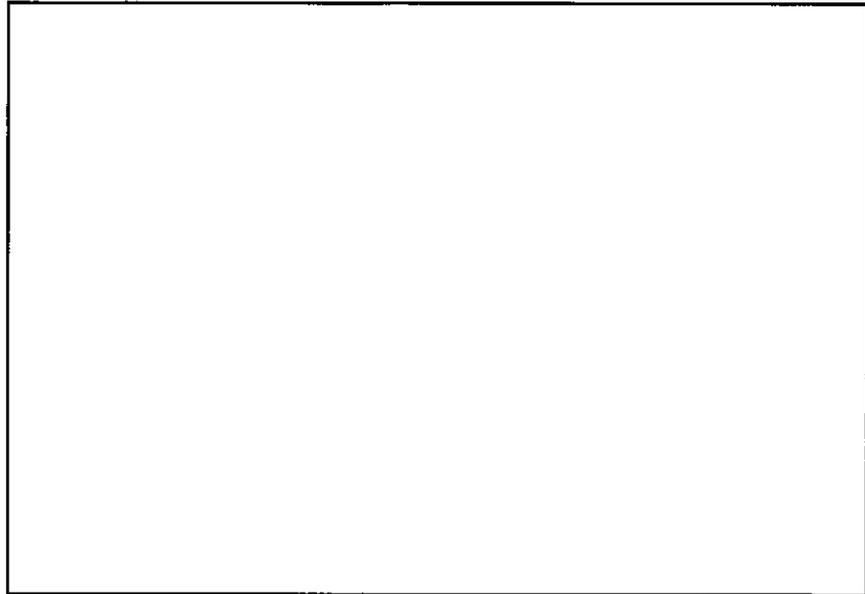
写真(口)A 参 3-8



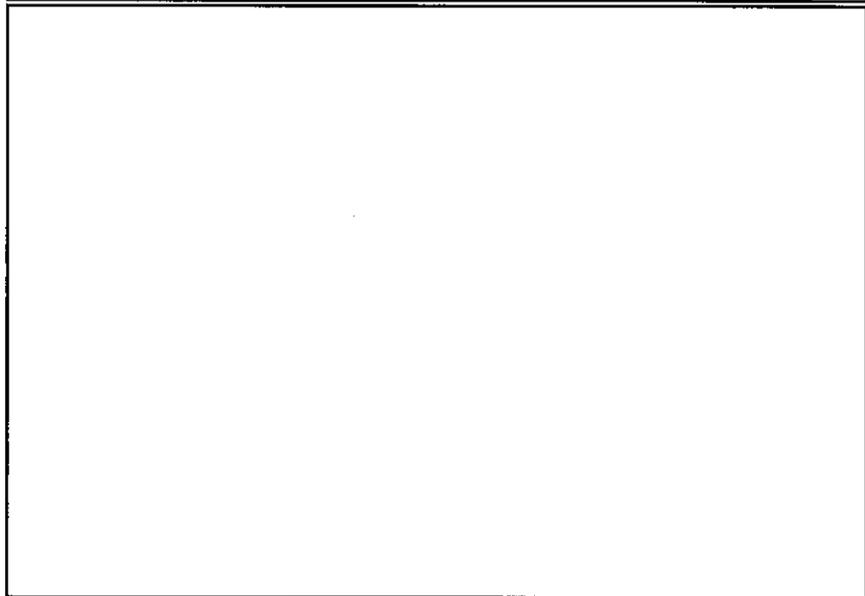
写真(口)A 参 3-9



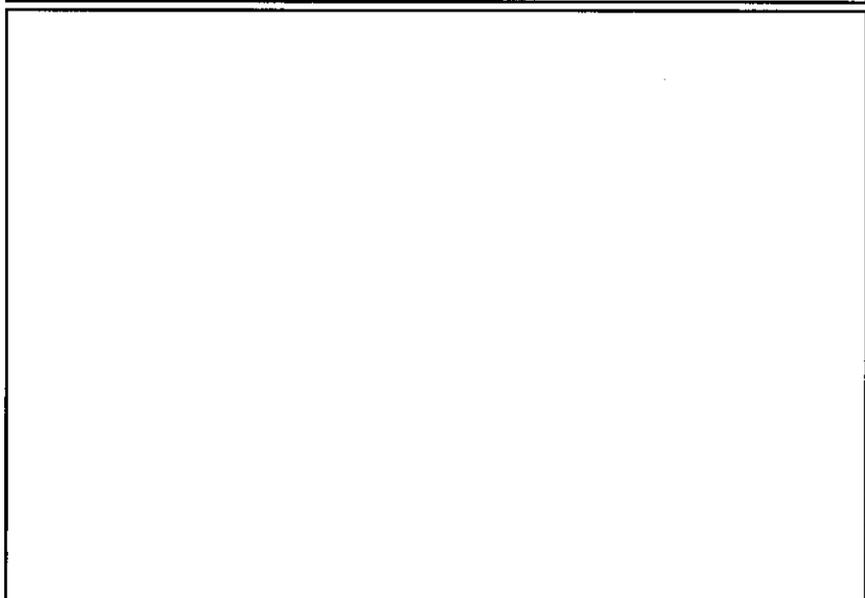
写真(口)A 参 3- 10



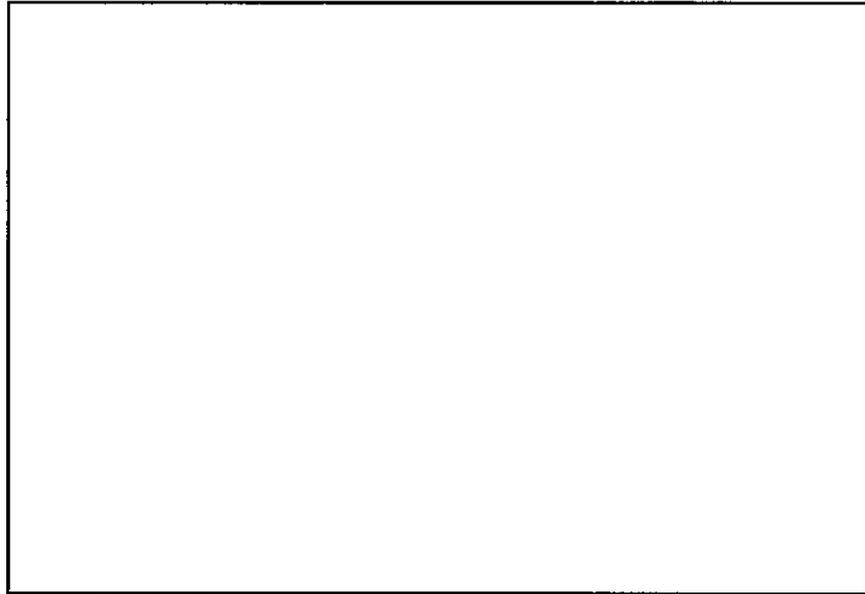
写真(口)A 参 3- 11



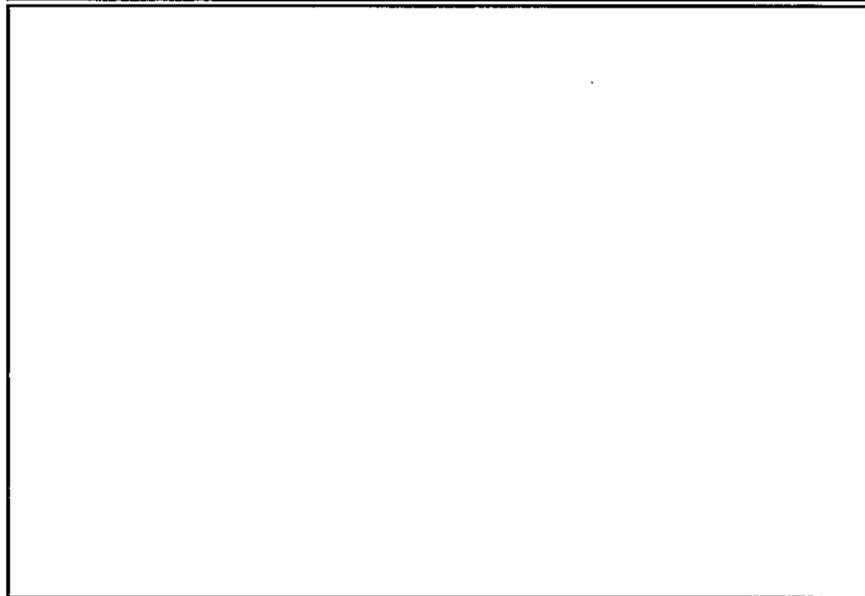
写真(口)A 参 3- 12



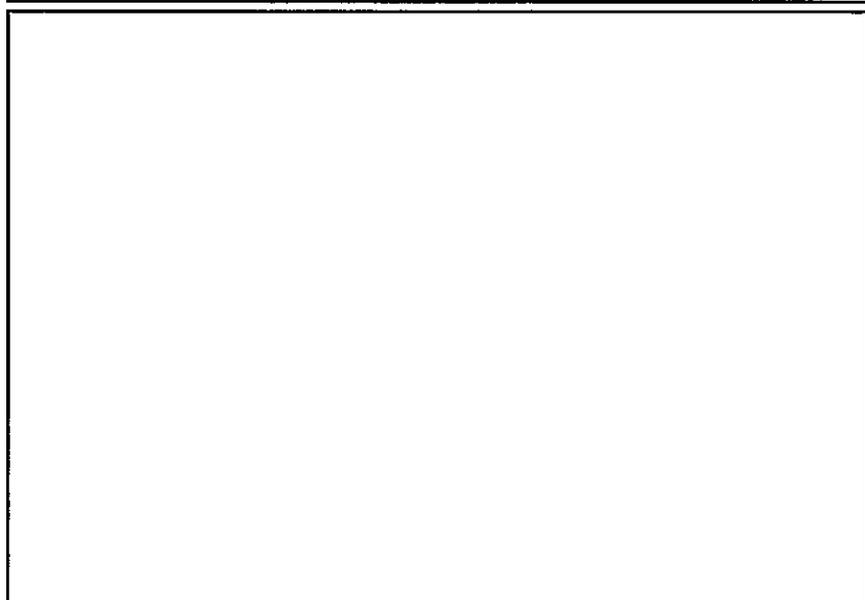
写真(口)A 参 3- 13



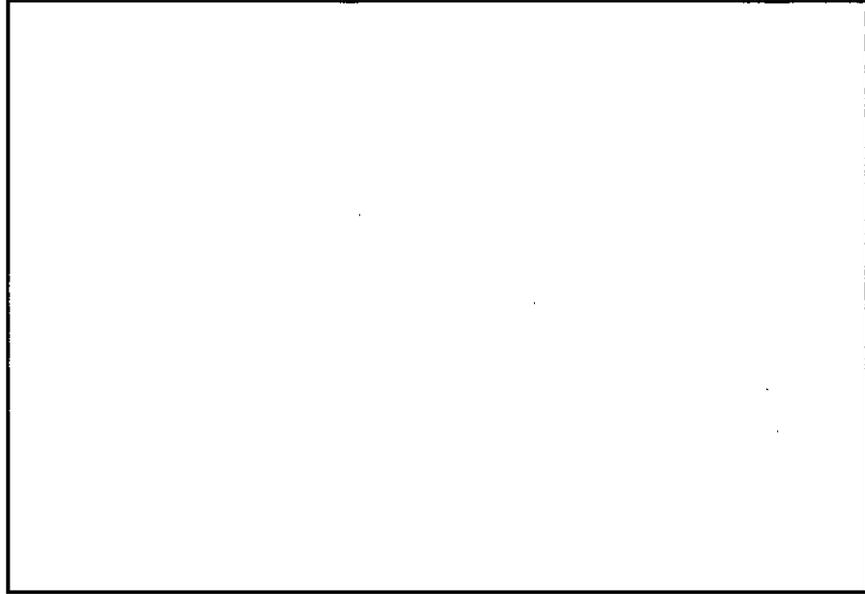
写真(口)A 参 3- 14



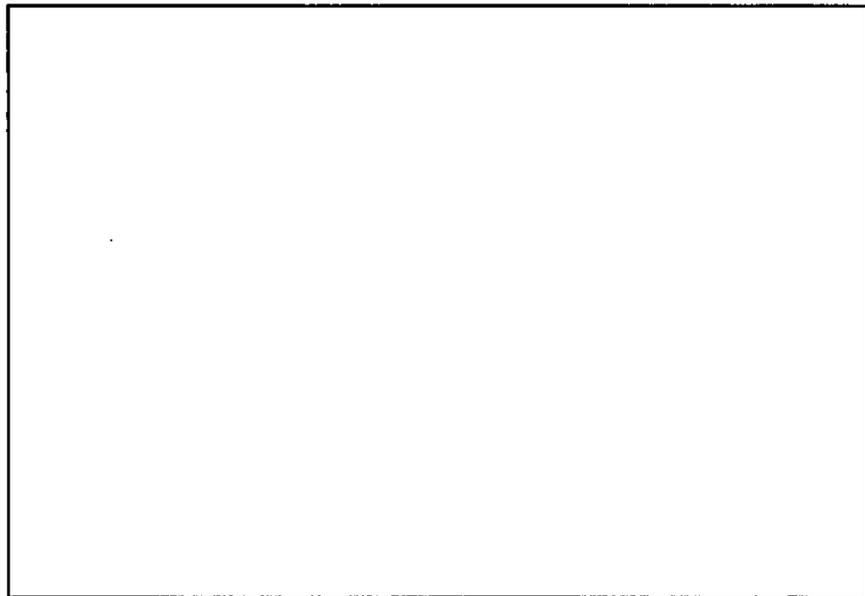
写真(口)A 参 3- 15



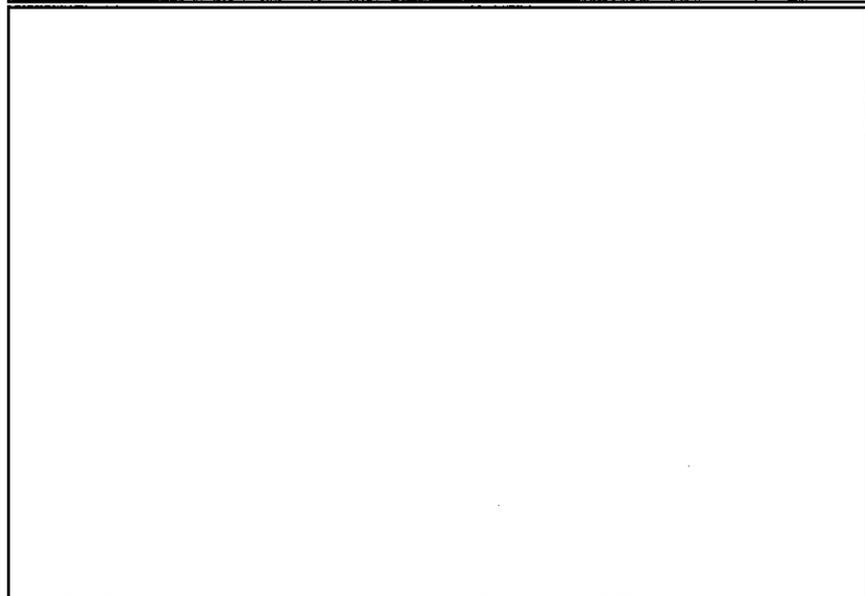
写真(口)A 参 3- 16



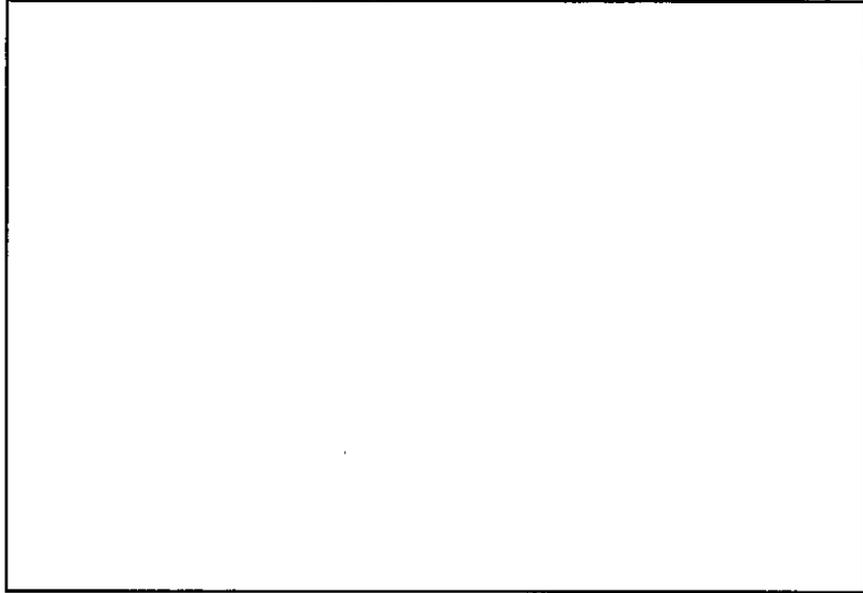
写真(口)A 参 3- 17



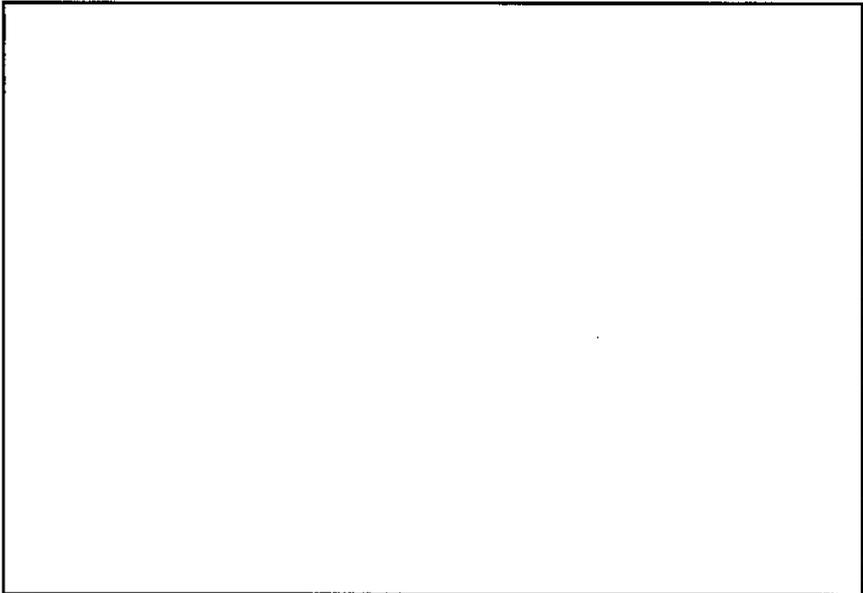
写真(口)A 参 3- 18



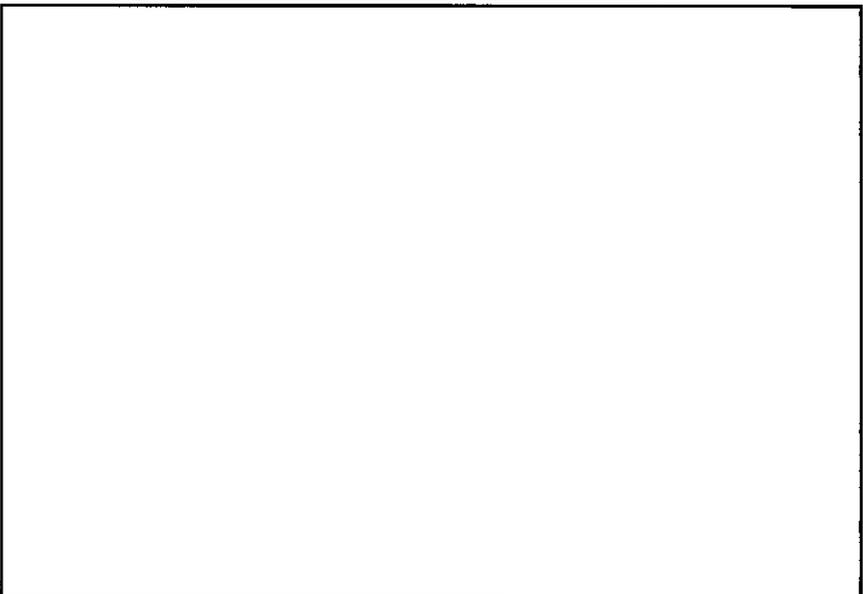
写真(口)A 参 3- 19



写真(口)A 参 3- 20



写真(口)A 参 3- 21



参考資料(口)-A.4

使用部材の低温における性質

参(口)A.4-1

1. 概 要

NFI-V型に使用している部品材料の低温における性質を検討する。検討した金属材料は、輸送容器の主要構成材 SUS304、中性子吸収材であるボロン入り SUS304 及びロッドボルトの材料である SCM435、有機材料としてブチルゴム、シリコンゴムである。

2. 金属材料の低温での性質

(1) SUS304

SUS304 等のオーステナイト系ステンレス鋼は低温における強さやじん性に優れた特性を持つ材料である。図(ロ)A 参 4- 1 及び 図(ロ)A 参 4- 2 に示すように、低温における引張特性、衝撃特性の著しい低下はなく、機能を損なうことはない。

(2) ボロン入り SUS304

本輸送容器の中性子吸収材は、ボロン濃度 \square % のボロン入り SUS304 を使用している。図(ロ)A 参 4- 3 にボロン入り SUS304 のシャルピー衝撃試験結果を示す。これより -40℃ においてボロン入り SUS304 に低温脆化を起こさないため問題ない。

(3) SCM435

SCM435(クロムモリブデン鋼)は鉄にクロム、モリブデンを添加した低合金鋼の一種であり、焼入れ焼戻しを施すことで、高い機械的強度を得ることのできる材料である。

図(ロ)A 参 4- 4 及び 図(ロ)A 参 4- 5 に示すように、クロムモリブデン鋼の低温における引張特性、衝撃特性の著しい低下はなく、機能を損なうことはない。

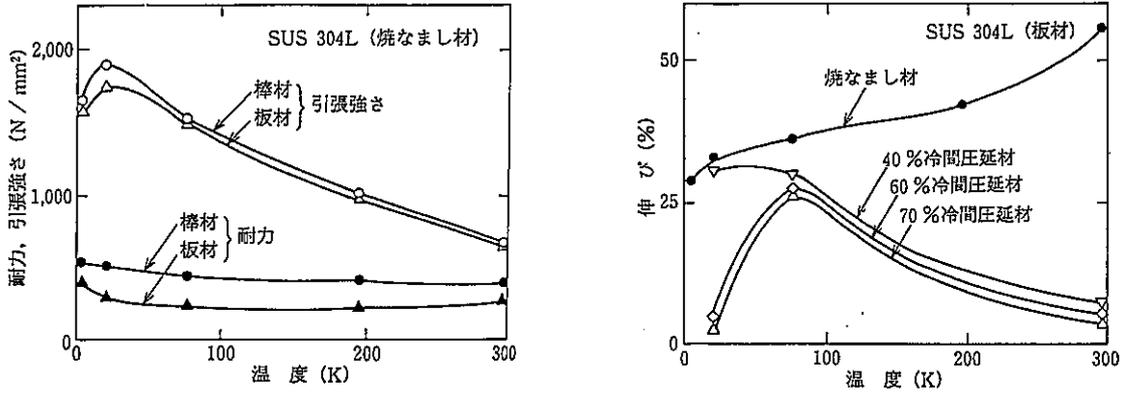
3. 有機材料の低温での性質

輸送容器に使用されている有機材料は、ブチルゴム (ショックマウントに使用されている防振ゴム) とシリコンゴム (密閉をするためのガスケットとして使用) である。

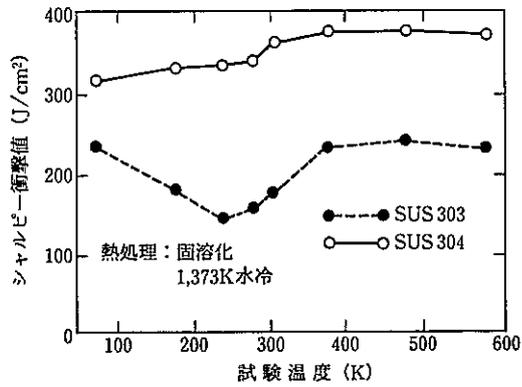
表(ロ)A 参 4- 1 より、ブチルゴムの脆化温度は -55℃、シリコンゴムの脆化温度は -75℃ でありどちらも -40℃ において低温脆化は起こらないため問題ない。

4. 結 論

輸送容器の主要部に使用されている材料は、-40℃ においても著しい性能上の低下を引き起こすことはない。

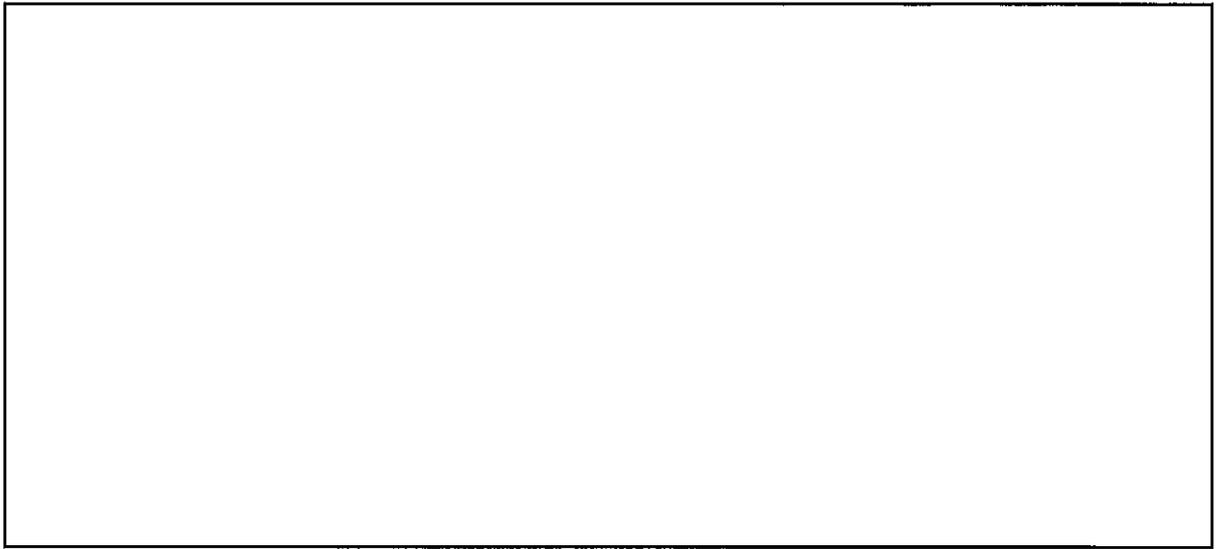


図(ロ)A 参 4-1 オーステナイト系ステンレス鋼の低温における引張特性

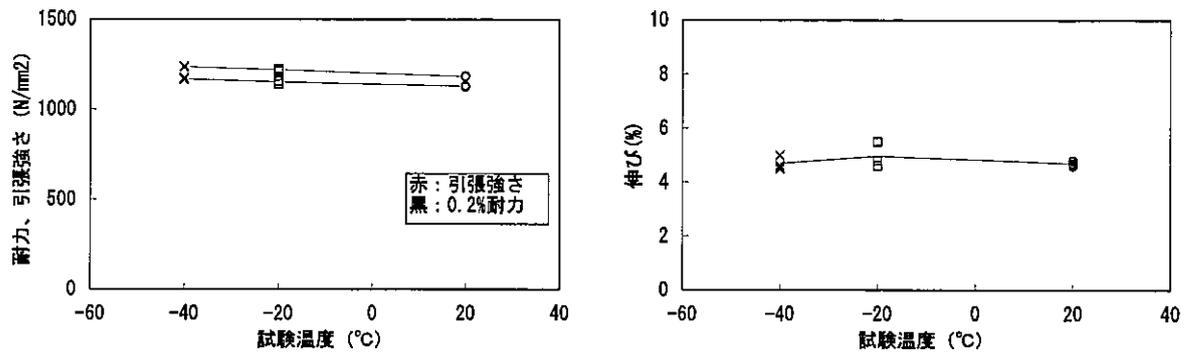


図(ロ)A 参 4-2 オーステナイト系ステンレス鋼の低温における衝撃特性

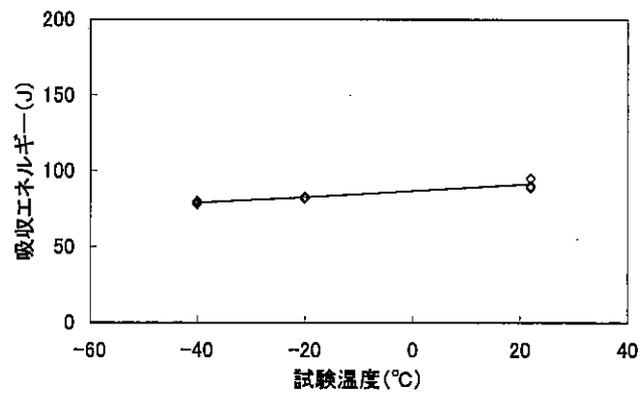
出典: ステンレス鋼データブック (ステンレス協会 編)



図(ロ)A 参 4-3 ボロン入り SUS304 シャルピー衝撃試験



図(ロ)A 参 4-4 クロムモリブデン鋼の低温における引張特性



図(ロ)A 参 4-5 クロムモリブデン鋼の低温における衝撃特性

表(ロ)A 参 4-1 各種ゴムの特性の比較

特性	ゴムの種類										
	天然 ゴム	SBR	ウレ タン	クロ ロ プ レ ン ゴ ム	EPT	ニトリ ルゴム	ブチル ゴ ム	アクリ ル ゴ ム	シリ コ ン ゴ ム	フロ ロ シ ン ゴ ム	ふっ 素 ゴ ム
かたさ, 度	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	75
引張強さ, kg/cm ²	210	140	210	150	155	180	110	120	70	80	115
伸び, %	470	300	500	360	430	300	450	200	190	190	240
引裂強さ kg/cm	44	42	65	30	47	45	60	32	12	18	39
耐摩耗性, (アブレーション) %	7.3	8.3	5.8	14	10	6.1	2.1	5.3	28	12	14
気体透過性 (N ₂) 注1)	1	0.7	0.2	0.2	1	0.08	0.03	0.3	17	5	0.08
絶縁破壊の強さ KV/mm	1	4	1	3	0.5	4	0.5	3	16	14	8
圧縮永久ひずみ 125°C/70h, %	85	14	100	29	32	25	55	33	8	14	16
耐放射線性 (γ線) 注2)	50	25	50	5	10	15	1	10	6	4	5
耐薬品性, 体積膨潤率%											
ブチルアセテート 25°C/70h	+120	+100	+100	+110	+12	+115	+27	+175	+78	+175	+290
アセトン 25°C/70h	+11	+18	+87	+31	+1	+125	+2	+200	+18	+200	+165
浅硝酸 25°C/70h	×	×	×	×	+4	×	+4	+52	+25	+2	+5
メタノール 25°C/70h	+1	+2	+28	+8	-5	+18	-2	+140	0	0	+68
ASTM #1 100°C/70h	+160	+44	-8	+8	+90	-4	+105	+2	+7	0	0
ASTM #3 100°C/70h	+600	+105	+5	+68	+140	+15	+215	+16	+23	+3	+1
Fuel A 25°C/70h	+120	+52	0	+14	+70	+2	+110	-2	+93	+3	0
ベンゼン 25°C/70h	+240	+180	+110	+170	+80	+155	+90	+215	+70	+23	+10
シリコンオイル 150°C/70h	-6	-3	-9	-2	-10	-4	-5	-3	+17	0	0
水酸化ナトリウム液 25°C/70h	0	-2	+2	+1	-1	+1	0	0	0	0	0
ぜい化温度 °C	-55	-55	-55	-50	-55	-40	-55	-25	-75	-75	-40
高温可使温度 °C	+100	+120	+150	+150	+160	+120	+120	+175	+260	+230	+260

(出典) シリコンゴム, 日本ゴム協会誌

燃料棒被覆管の応力基準値

NFI-V 型輸送物の設計変更時の安全解析における燃料棒被覆管の応力基準値について説明する。

安全解析では、80℃及び385℃における被覆管の応力基準値について表(ロ)A 参 5-1 のように定めている。

表(ロ)A 参 5-1 被覆管の機械的性質の基準値 単位(MPa)

		基準値	
80℃*	引張強さ		
	耐力		
385℃*	引張強さ	—	
	耐力		

* 太陽輻射及び耐火試験時の被覆管温度がそれぞれ□℃及び□℃となることから、保守的にこれらを包絡する(80℃及び385℃)温度としている。

(耐力)

耐力基準値は燃料集合体被覆管材であるジルカロイ 4 及びジルコニウム合金の耐力を包絡した以下の経験式で求められる。本式は、燃料集合体許認可の評価に用いられているものである。

$$\sigma_y \text{ (kg/mm}^2\text{)} = \boxed{\hspace{10em}} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

表(ロ)A 参 5-2 に本式により求められる耐力とジルカロイ 4 及びジルコニウム合金の機械的評価結果から得た耐力をそれぞれ常温(RT)時と高温(385℃)時について示す。本表から明らかのように本式で求めた耐力は常温(RT)時と高温(385℃)時においてそれぞれ実際よりも保守的なものであることが判る。また、図(ロ)A 参 5-1 に評価式により得られる耐力と安全解析に用いた耐力の基準値、常温(RT)時と高温(385℃)時のジルカロイ 4 及びジルコニウム合金の機械的評価結果から得た耐力を示す。本図からも評価式から求めた基準値が保守的な設定となっていることが判る。

表(ロ)A 参 5-2 被覆管材と評価式の耐力の比較

単位(MPa)

	ジルコニウム合金		ジルカロイ-4		評価式
常温(RT)	□	~ □	□	~ □	□
高温(385°C)	□	~ □	□	~ □	□

(引張強さ)

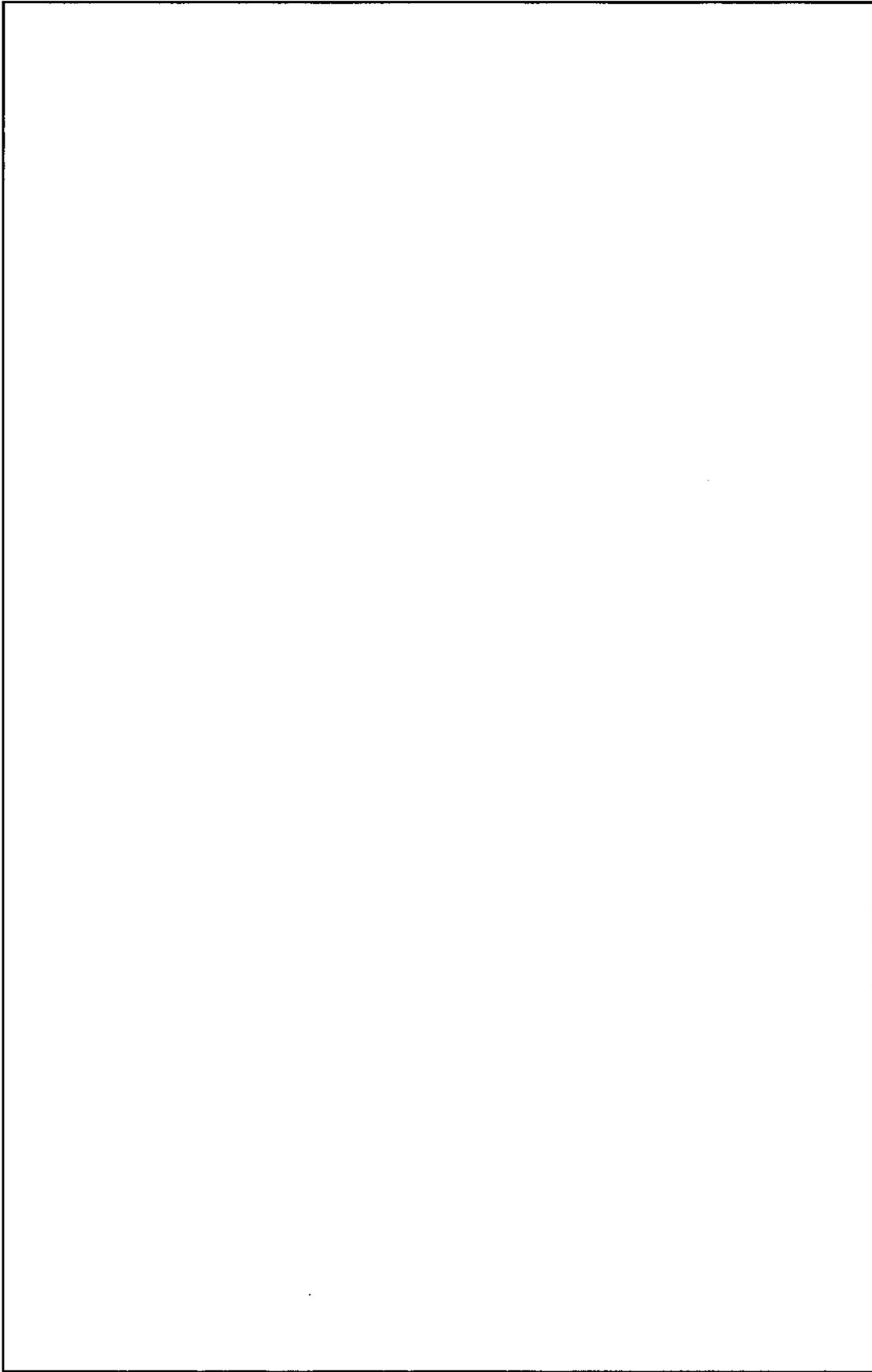
常温(RT)時と高温(385°C)時のジルカロイ 4 及びジルコニウム合金の引張強さを表(ロ)A 参 5-3 に示す。これらと 80°Cにおける引張強さ基準値をあわせて図(ロ)A 参 5-1 に示す。また、80°Cにおける基準値と比較しやすくするため及び時と高温時のジルカロイ 4 及びジルコニウム合金の引張強さの最低値同士を直線で結んでいる。これらから、80°Cにおける引張強さ基準値は保守的であることが判る。

表(ロ)A 参 5-3 被覆管材の引張強さの比較

単位(MPa)

	ジルコニウム合金		ジルカロイ-4	
常温(RT)	□	~ □	□	~ □
高温(385°C)	□	~ □	□	~ □

以上のように、NFI-V 型輸送物の安全解析で用いている被覆管の応力基準値は十分に保守的なものであり、安全解析上の基準値とすることは妥当である。



図(口)A 参 5-1 被覆管の耐力と引張強さ

参考資料(ロ)-A.6

ショックマウントの経年変化における安全評価への影響確認

1. ショックマウントの繰り返し使用後における経年変化の確認

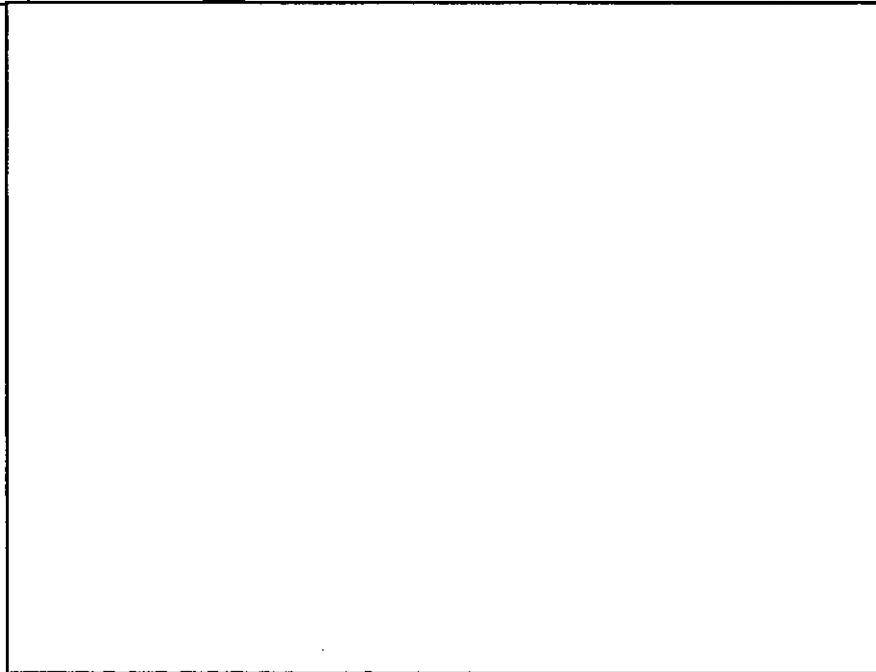
ショックマウントはショックマウントフレーム及びストロングバック、輸送中においてはそれらに加え収納物を保持し、輸送中の振動及び衝撃を吸収する機能を持つ。ショックマウントは、輸送中に発生する振動・衝撃の影響や、ショックマウントフレーム、ストロングバック及び収納物による荷重を支えることにより、経年変化が生じる。経年変化の影響を確認するため、繰り返し使用されてきたショックマウントに対してせん断ばね定数試験を実施し、その結果を踏まえ安全評価への影響確認を行った。

2. 荷重変位測定試験

経年変化の影響を確認するため、NFI-V 型輸送容器に装着されていたショックマウント(使用期間：□□□□～□□□□)の性能を確認するため、荷重変位測定試験を実施した。試験体系は図(ロ)-A.3 のせん断ばね定数試験と同様とした。

荷重変位測定結果を図(ロ)A 参 6-1 に示す。

図(ロ)A 参 6-1 より得られるバネ剛性は約□□N/mm となり、経年変化により使用前のバネ剛性(約□□N/mm)と比べ□□N/mm バネ剛性が大きくなっていることが確認できる。



図(ロ)A 参 6-1 ショックマウントの荷重変位測定試験結果

3. 経年変化に伴うショックマウントのバネ剛性増加による安全評価への影響確認

経年変化によりショックマウントのバネ剛性が増加することを確認したため、バネ剛性増加による安全評価への影響確認を実施する。ショックマウントは収納物に与える落下時の衝撃を吸収する役割を持つため、一般の試験条件及び特別の試験条件における自由落下の安全評価への影響確認を行う。

(1) 1.2 m 自由落下時におけるショックマウントの経年変化による安全評価への影響確認

1.2 m 自由落下時において、ショックマウントが防振構造物の落下エネルギーを吸収するとしたときの、収納物に加わる加速度は次式で求める (A.5.3.1 参照)。

$$\alpha = \sqrt{\frac{Kh}{WG}} G$$

ここで

α 収納物に加わる加速度 m/s^2

K ショックマウントのバネ剛性

図(口)A 参6-1 よりショックマウント1個当りのバネ剛性は N/mm であるため、
18個あたりでは、

$$K = 18 \times \text{} = \text{} \text{ N/mm}$$

h 落下高さ 1200 mm

W 防振構造物重量 kg

G 重力加速度 9.80665 m/s^2

これらを用いると

$$\alpha = \sqrt{\frac{\text{}}{\text{}} \times 9.80665}$$

$$= \text{} \text{ m/s}^2$$

重力加速度の比で表すと

$$\alpha = \text{} G$$

経年変化によりバネ剛性が高くなったことで、「A.5.3.1 各姿勢での1.2 m 自由落下」で評価される加速度(G)よりも %ほど大きくなるが、「A.9.2.1 強度試験・落下試験 I (9 m 落下時)」で述べられる落下試験の際、 G の最大加速度が燃料集合体に発生した場合でも燃料棒に破損は生じていないことから、経年変化により剛性が高くなった場合においても1.2 m 落下での衝撃にて収納物に影響を与えない。

(2) 9 m 自由落下時におけるショックマウントの経年変化による安全評価への影響確認

特別な試験条件下での 9 m 落下では「A.9.2.1.2.2 燃料集合体の健全性」にて、防振構造物と輸送容器内壁が落下時の衝撃により衝突し、収納物に衝撃が加わることが確認される。よって収納物に与えられる衝撃は、輸送容器内壁と防振構造物との衝突によるものだということが確認できる。バネ剛性が大きくなることで、落下時における防振構造物の変位が抑制され防振構造物と輸送容器内壁との衝撃の緩和に寄与することから、経年変化によるバネ剛性の増加により、収納物の健全性に影響を与えることはない。

参考資料(口)-A.7

固有振動数導出に係る補足説明資料

1. 固有振動数の導出

固有振動数を導出するにあたって使用したプログラム()、及び固有振動数評価にて作成した解析モデルについて説明する。

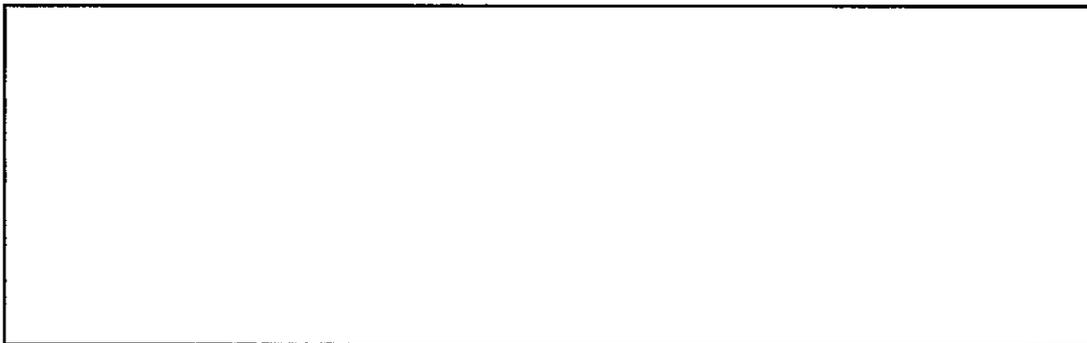
2. FAP-3 について

本評価に用いたプログラム()とは、()が開発した線材（部材）と平板要素で構成された任意形状構造の弾性応力解析、及び固有振動数解析を行うためのプログラムである。材質、断面情報、拘束条件等のインプットを入力し、立体フレームモデルを作成することで発生する固有振動数や応力を導出することが可能である。

3. 解析モデル

3.1 概要

本解析モデルの概要図を図(ロ)A 参 7-1 に示す。本モデルでは NFI-V 型輸送物について、円筒状の梁要素を用いてモデル化した。実物と同様円筒構造とし、はり要素の断面、及び剛性は外容器の外板・内板の材質であるステンレス鋼を考慮している。なおストロングバック、ショックマウントフレームについては考慮していないため、本モデルの固有振動数は実体より小さくなっている。

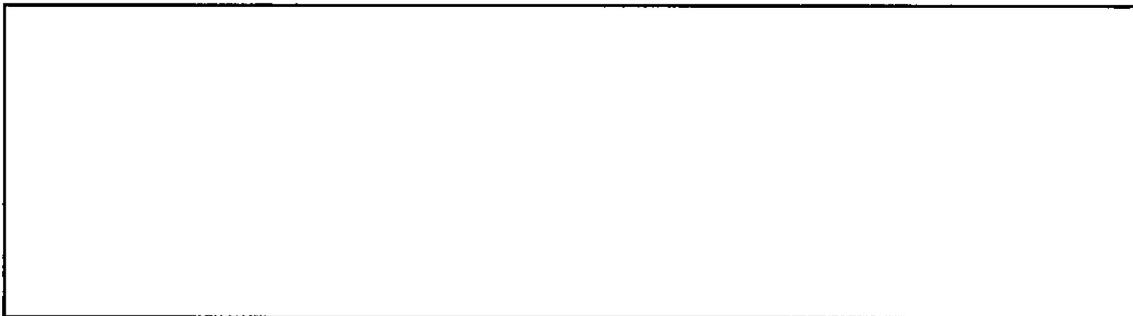


図(ロ)A 参 7-1 モデル概要図

3.2 拘束条件

本解析モデルの拘束条件を図(ロ)A 参 7-2 に示す。赤丸で囲った 2 点が拘束点となる。

輸送中の容器は固縛機材やコンテナ等によって 4 方向を面で抑えて固定するが、モデル上における拘束点は下面の脚のみで拘束する形でモデル化した。そのため、本モデルの固有振動数は実体より小さくなっている。拘束点は全ての並進を固定し、回転の固定はかけていない。



図(ロ)A 参 7-2 拘束点のモデル化要素

4. 解析結果

3で述べた解析モデルの固有振動数を求めた結果、固有振動数は□Hzとなった。この固有振動数は輸送中のトラックにおける固有振動数(□Hz未満)と比べて大きく、共振する恐れがないことが確認出来た。

(ロ)-B 熱 解 析

B.1 概 要

本輸送容器は燃料加工工場での収納物の梱包から開梱までの、全輸送工程中に予想される温度条件に耐えるよう設計されている。なお、本輸送容器に収納する核燃料物質は、未照射の二酸化ウラン焼結体(UO₂ 焼結体)又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体であり、崩壊熱は最大でも□W以下と無視できるほど小さい。

熱解析については、一般の試験条件下及び特別の試験条件下における熱が輸送物にどのような影響を及ぼすかについて述べる。

本解析では一般の試験条件下における低温環境を考慮して最低使用温度を検討する。

B.2 材料の熱的性質

輸送容器構成材料の熱的性質を表(ロ)B-1に示す。

B.3 構成要素の仕様

輸送容器は収納物を収容するストロングバック、ストロングバックを固定するショックマウントフレーム及びこれらを覆う上側、下側ケースから成る。上側及び下側ケースともに内筒及び外筒から構成されており、材質はステンレス鋼(SUS304)である。内筒と外筒の間には断熱材としてセラミックファイバーを充填している。下側ケース内面にはショックマウントフレームを弾性的に支えるショックマウントが取り付けられている。ショックマウントフレーム及びストロングバックの材質は、ステンレス鋼(SUS304)であり、中性子吸収材のボロン入りステンレス鋼板はストロングバックに固定されている。

燃料は二酸化ウランであり、ジルカロイ-4製又はジルコニウム合金製の被覆管に収納し燃料棒としている。燃料集合体の場合は支持格子により燃料棒は正方形配列に束ねている。燃料棒組立体の場合は専用バスケット内で支持構造によって正方形配列に束ねている。上側ケースと下側ケースとのフランジ面の間にシリコンゴム製のガスケットを使用し、輸送容器への雨水の浸入を防止している。

表(ロ)B-1 輸送容器構成材料の熱的性質*

材 料 (構 成 部)	密 度 (kg/m ³)	比 熱 (kcal/kg・°C)	熱伝導率 (kcal/m・h・°C)
ステンレス鋼 (SUS304) (上側ケース, 下側ケース, ショックマウント及びストローク・バッグ*)	7.8×10 ³	0.12	14.0
合成ゴム (ブチルゴム) (ショックマウント)	0.92×10 ³	0.44	0.148
合成ゴム (シリコンゴム) (ガスケット)	1.2×10 ³	0.28~0.35	0.19
ジルカロイ-4 ジルコニウム合金 (被覆管)	6.55×10 ³	0.078	37.0

※参考資料(ロ)B.1参照

B.4 一般の試験条件

本輸送物は A 型核分裂性輸送物であるため、B 型輸送物に要求される一般の試験条件下での熱的試験は該当しない。ただし、核分裂性輸送物に要求される特別の試験条件下の耐火試験に供する前の条件として、環境温度 38℃、太陽輻射下で輸送物表面温度が一定になるまで置くことが求められるため、本項では環境温度 38℃、太陽輻射下で 1 週間置くとした条件で評価を行う。

B.4.1 熱解析モデル

B.4.1.1 解析モデル

(1) 最高温度解析条件

一般の試験条件下における輸送物の最高温度は、外筒表面における伝熱方程式を解いて求める。

一般の試験条件下での落下試験及び貫通試験後に容器は、損傷することなく、コーナーのへこみにより仕様よりも表面積が減少しているが、太陽からの輻射伝熱量は、表面積が大きい程大きくなるので、表面積の大きい仕様寸法を用いた方が温度の高い解析結果を得る。また、解析モデルでは外筒のみとし、安全側に内筒は考慮しない。したがって、本解析では、輸送物の寸法を直径 m、長さ m の円筒型として取り扱う。

最高温度到達時には輸送物各部の温度は、一定となり、太陽からの放射伝熱量が輸送物表面からの放出熱量に等しい平衡状態になるものとして、輸送物の最高温度を求める。

(2) 最低温度解析条件

環境温度を -40℃ とする。

(3) 最大内圧解析条件

内筒内の全容積が理想気体で満たされているものとし、内筒の最高温度を外筒表面温度と等しいとしてボイル・シャルルの法則から最大内圧を求める。

B.4.1.2 試験モデル

試験モデルは使用しない。

B.4.2 最高温度

(1) 解析項目

一般の試験条件下での太陽輻射による輸送容器表面での最高温度を解析する。

(2) 解析条件

計算条件は以下の通りである。

- ・ 環境温度 (T_0) : 38 °C
- ・ 内部発熱量は 0
- ・ 円筒内部は断熱
- ・ 太陽による放射熱流束は円筒表面において $q''=400 \text{ W/m}^2$

(3) 解析方法

本計算では円筒の軸方向の長さは単位長さあたり (m) で考える。

輸送容器表面での最高温度は、輸送物の温度が平衡状態に達していると仮定すれば次式で表される。

ここで

軸方向の単位長さあたりの円筒が受ける全太陽放射熱量 Q は次式より与えられる。

自然対流熱伝達係数 (h_c) は次式で与えられる。(参考資料(ロ)・B.1 文献(1))

..... (3)

ここで

である。

放射熱伝達係数は次式で表される。

..... (4)

ここで

..... (6)

(4) 解析結果

(1)~(4)式から T_s を求めると、

$$T_s = \square \text{ } ^\circ\text{C}$$

したがって本試験条件下での輸送容器表面での最高温度は \square $^\circ\text{C}$ である。主要構造材であるステンレス鋼は \square $^\circ\text{C}$ になっても劣化は生じず、使用している材質が機能を損なうことはない。

B.4.3 最低温度

(1) 環境条件

最低使用温度を $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ とする。

(2) 検 討

輸送容器に使用している部品材料は、金属材料としてステンレス鋼及び有機材料としてブチルゴム及びシリコンゴムである。各材料の低温に於ける特性値を「参考書類 (ロ)・A.4」に示す。

本輸送容器の最低使用温度である $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ においても著しい性能上の低下を引き起こすことはなく、この範囲の温度では亀裂・破損等を生じるおそれはないため使用上問題は無い。

B.4.4 最大内圧

一般の試験条件下における輸送物の圧力上昇は温度上昇によるもののみである。また、収納物の梱包は屋内で実施されることから、初期温度条件を保守的に 0℃とする。この温度上昇による輸送容器及び燃料棒の内圧を次式で計算する。

$$P = P_s \frac{T + 273}{T_s + 273} \text{ ----- (1)}$$

ここで

P : 最大内圧

P_s : 常温時の内圧 Pa (容器)、 Pa (燃料棒)

T : 最高温度 °C (「B.4.2 最高温度」に示す太陽輻射を考慮した輸送容器表面最大温度)

T_s : 初期温度 0 °C

輸送容器内圧は梱包時に不活性ガス等で加圧する可能性があることから常温時において Pa とする。燃料棒内圧は種類毎に異なるが、ここでは最も高い Pa (17×17型) とする。

(1)式を用いて最大内圧を計算すると輸送容器では Pa となり、燃料棒では Pa となる。従って、輸送容器の応力解析には、内圧が Pa、外圧が Pa とし、内外圧力差 Pa を用いる。また、燃料棒の応力解析には、内圧が Pa、外圧が Pa とし、内外圧力差 Pa を用いる。

B.4.5 最大熱応力

太陽輻射により使用材料各部に温度差が生ずるが、構造材が金属のため熱伝導率がよいので輸送容器各部の温度差は小さく、温度勾配による熱応力は使用材料の耐力に比較して小さく機械的健全性は十分である。

B.4.6 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下での熱的解析結果を表(ロ)B-2に示す。

表(ロ)B-2 一般の試験条件下の熱的解析結果

項 目	結 果
最 高 温 度	輸送容器表面で最高 <input type="text"/> °C 使用材料に劣化は生じず、機能を損なうことはない。
最 低 温 度	使用時最低温度 -40°C 使用材料に脆性破壊やじん性低下は生じない。
最 大 内 圧	輸送容器内・外圧差 <input type="text"/> Pa 燃料棒内・外圧差 <input type="text"/> Pa
最 大 熱 応 力	構造材が金属で薄板であり熱伝導率が良いため、温度差による熱応力は使用材料の降伏応力と比較して小さく機械的健全性は十分である。

B.5 特別の試験条件

輸送物が規則及び告示に示される特別の試験条件下において表(ロ)B-3に示す解析基準を満足することを確認する。

表(ロ)B-3 解析項目一覧表

該当場所	解析項目	解析基準	備考
燃料棒	(1) 燃料棒被覆管最高温度	500 °C	耐力
	(2) 燃料棒被覆管円周方向歪量	□ MPa	

解析基準は、熱的な評価としては実験⁽⁸⁾にて被覆管の健全性が保たれる温度の500°Cとし、また機械的な評価としては385°Cのときの被覆管の耐力とする。

特別の試験条件では、水平に置いた輸送容器の周囲を800°Cの火災で30分間おおわれた状態を想定し、輸送容器温度分布の時間変化を考慮して密封境界としての燃料棒の温度を評価する。

B.5.1 熱解析モデル

B.5.1.1 解析モデル

該当しない。

B.5.1.2 試験モデル

耐火試験は、9 m 水平落下試験（上側ケース下向き）及び1 m 水平ターゲット落下試験後の原型容器を用いて実施した。試験条件として800°C以上の環境に、30分以上原型容器をおくために大型鉄鋼焼鈍炉を使用した。

試験時における容器の温度変化と最高到達温度を測定し、試験後原型容器及び収納物の損傷状態を検査した。収納物からの崩壊熱は、無視し得る程度のものであるので、試験時の収納物は、収納物の中で最も重い17×17型燃料集合体の構造を模擬した非発熱の模擬燃料集合体1体と重量模擬体1体とした。

B.5.2 輸送物の評価条件

耐火試験に供した原型容器は、耐火試験に先んじて、9 m 水平落下試験（上側ケース下向き）及び1 m 水平ターゲット落下試験を実施している。9 m 水平落下では、上側ケースの衝突面全体に均一に□mmの変形を生じた。1 m 水平ターゲット落下では9 m 水平落下の歪も含めて□mmの変形を生じたが貫通孔はなかった。試験後の容器内部検査では、内部構造物との衝突によると考えられる小さな穴が内筒に見られた。これら落下試験による容器の変形及び損傷は耐火試験時の輸送物の温度上昇に寄与する。

落下試験終了後、温度測定用の熱電対、非可逆性示温ラベル及び示温ペイントを取付けまたは塗布した輸送物を、炉に搬入して800℃で30分間の耐火試験を実施した。輸送物の温度は炉搬入前に約□℃であったが、「B.5.3 輸送物温度」では、一般の試験条件の太陽熱輻射による温度(□℃)との差を考慮する。

B.5.3 輸送物温度

本試験（参考資料(ロ)・B.2 NFI-V 型輸送容器 耐火試験結果報告書参照）では、耐火試験炉内温度を °C に昇温の後、供試物である原型容器を炉内に挿入、炉内温度を °C となるように制御し、 分間保持後供試物を取り出した。炉内温度は、熱電対で、輸送物の各部の温度は、熱電対、非可逆性示温ラベル及び示温ペイントにより測定した。熱電対は、原型容器各部に 20 個取付け、示温ラベル及び示温ペイントは収納物である模擬燃料集合体に取付けまたは塗布した。熱電対の取付け箇所を図(ロ)B-1、図(ロ)B-2 に示す。示温ラベル及び示温ペイントの取付けまたは塗布箇所を図(ロ)B-3 に示す。熱電対による温度測定結果を代表的なものについて示したものを図(ロ)B-4 に示す。

最高温度は外筒表面が °C（熱電対 5）、内筒で °C（熱電対 11）、燃料集合体 °C（熱電対 17）である。ただし、熱電対 12 は温度上昇が他の内筒表面温度の上昇に比べて著しく速く °C まで上昇している。これは、熱電対がフランジ接合部のガスケット横にあり、試験開始まもなくフランジ部のスペーサー（ウレタンゴム）が燃焼したことによりすき間が生じ、熱電対 12 は外部雰囲気さらされたためと考えられる。表(ロ)B-4 に熱電対で測定した各部の最高温度について示す。

熱電対の他に使用した非可逆性示温ラベルや示温ペイントはそれぞれ物質の融点及び顔料の化学反応を利用したもので、示温ラベルは ~ °C、示温ペイントは ~ °C の範囲でおおよその温度を知ることが出来る。表(ロ)B-5 に示温ラベル及び示温ペイントの測定結果を示す。この表より模擬燃料集合体の温度はおおよそ °C 程度まで上昇したと考えられる。

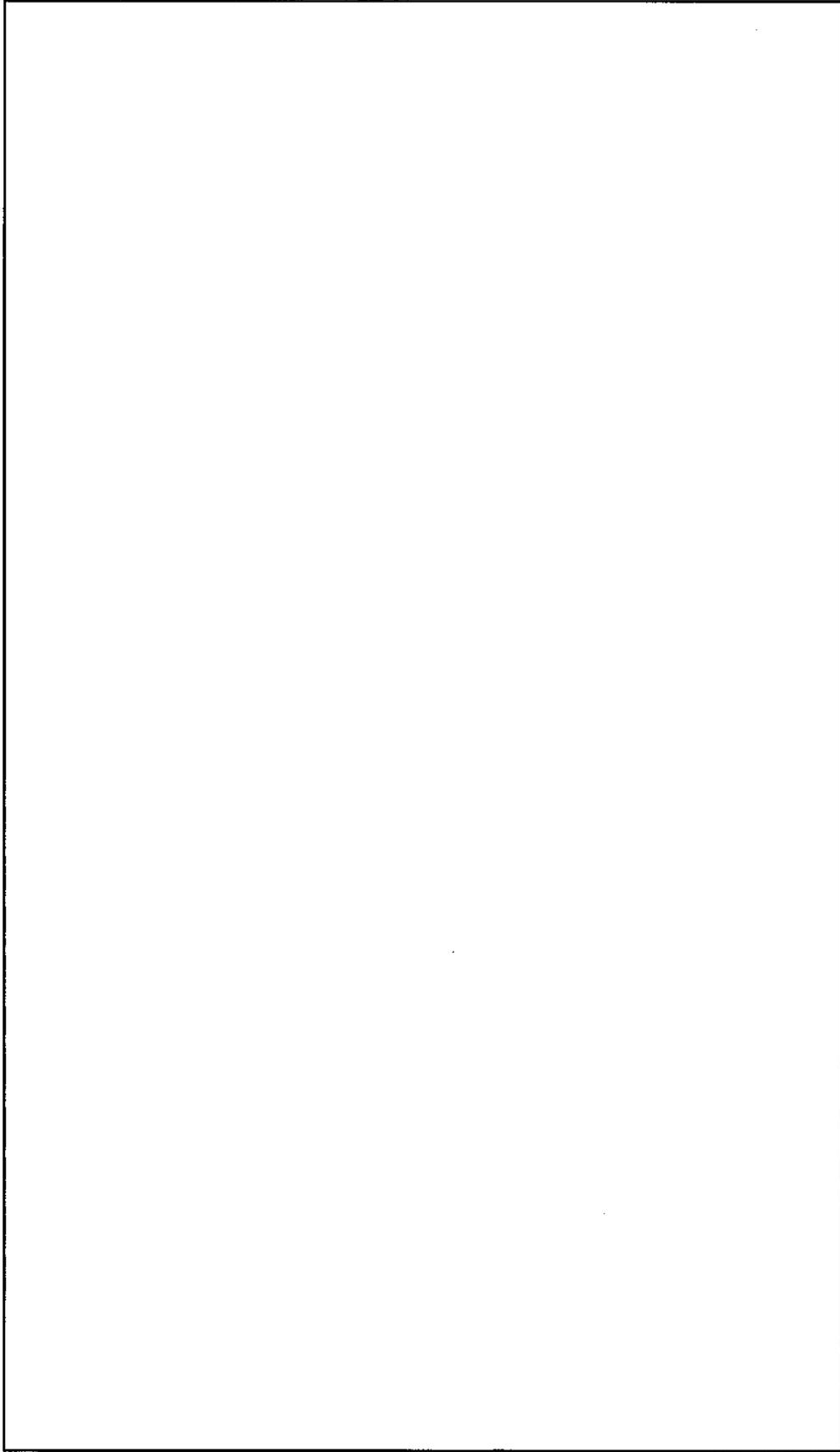
温度評価では、一般の試験条件で求めた最高温度 °C で炉に搬入したとして評価する。本耐火試験実施直前の輸送物の熱電対による温度は最低で熱電対 20 模擬燃料集合体表面の °C である。輸送物の温度を安全側に °C とした場合、一般の試験条件で求めた °C との温度差は °C である。炉内搬入前の温度差は、炉内搬入後そのまま持続もしくは拡大することはないが、ここでは炉内雰囲気温度(885.8 °C)を上限として測定結果により得られた各部の最高温度に単純に °C を加算して最高温度を求める。この結果外筒表面が °C、内筒内側 °C、燃料集合体 °C となる。「B.5.4 最大内圧」における解析では被覆管温度を安全側に °C として評価する。

表(ロ)B-4 外筒各部の最高温度

取付番号	最高温度 (°C)	試験開始後時間 (分)	備考
①			最低 : <input type="text"/> °C
②			最低 : <input type="text"/> °C
③			
④			
⑤			
⑥			
⑦			
⑧			
⑨			
⑩			
⑪			
⑫			
⑬			
⑭			
⑮			
⑯			参考値
⑰			
⑱			
⑲			
⑳			

表(ロ)B-5 示温ラベル及びペイントによる測定結果

測定結果と位置	測定された温度範囲
H ₁ H ₂ H ₃ H ₄ P ₁ P ₂ P ₃ P ₄	<input type="text"/>



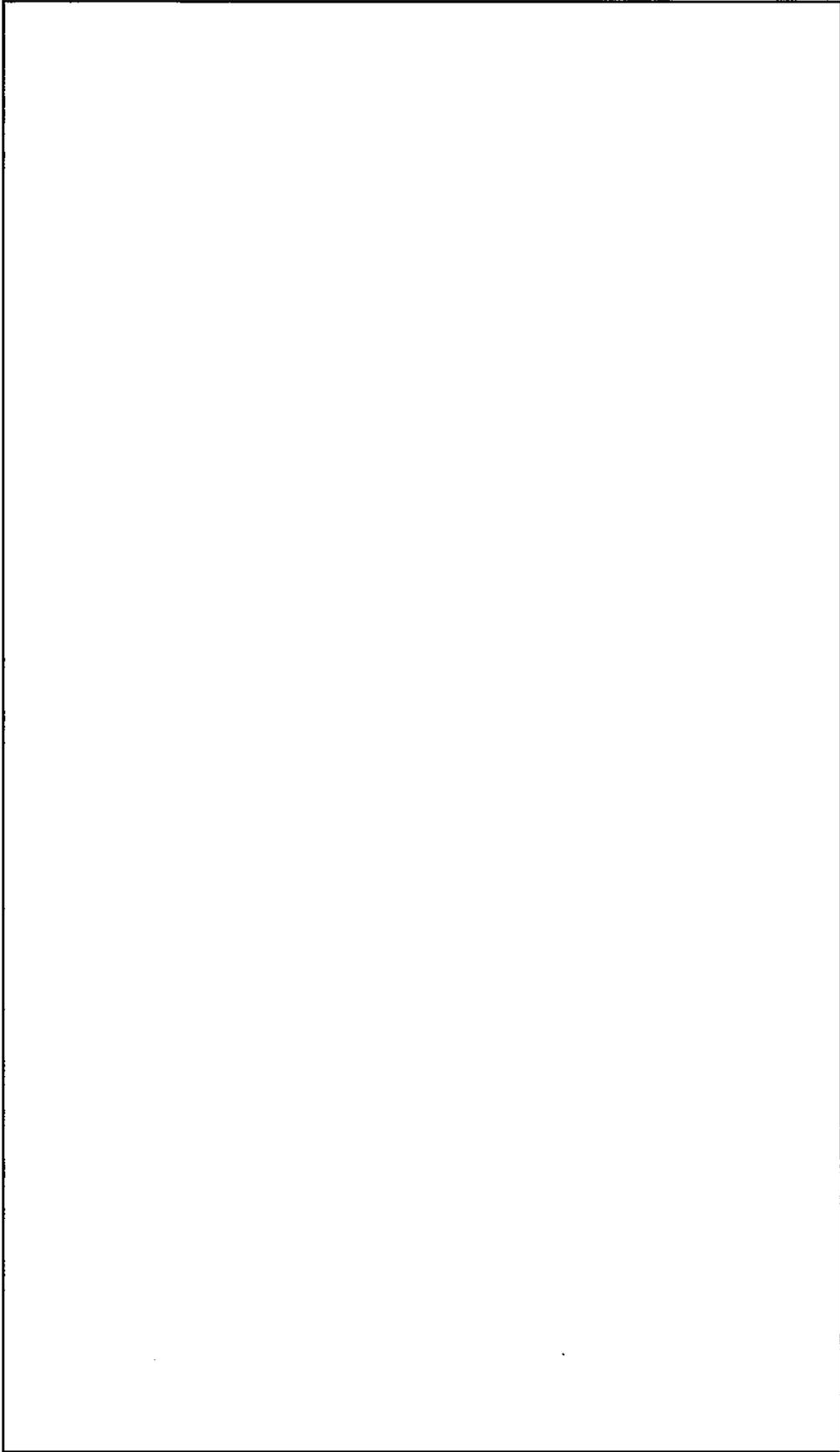
図(ロ)B-1 試験容器の熱電対取付け位置

(1/2)

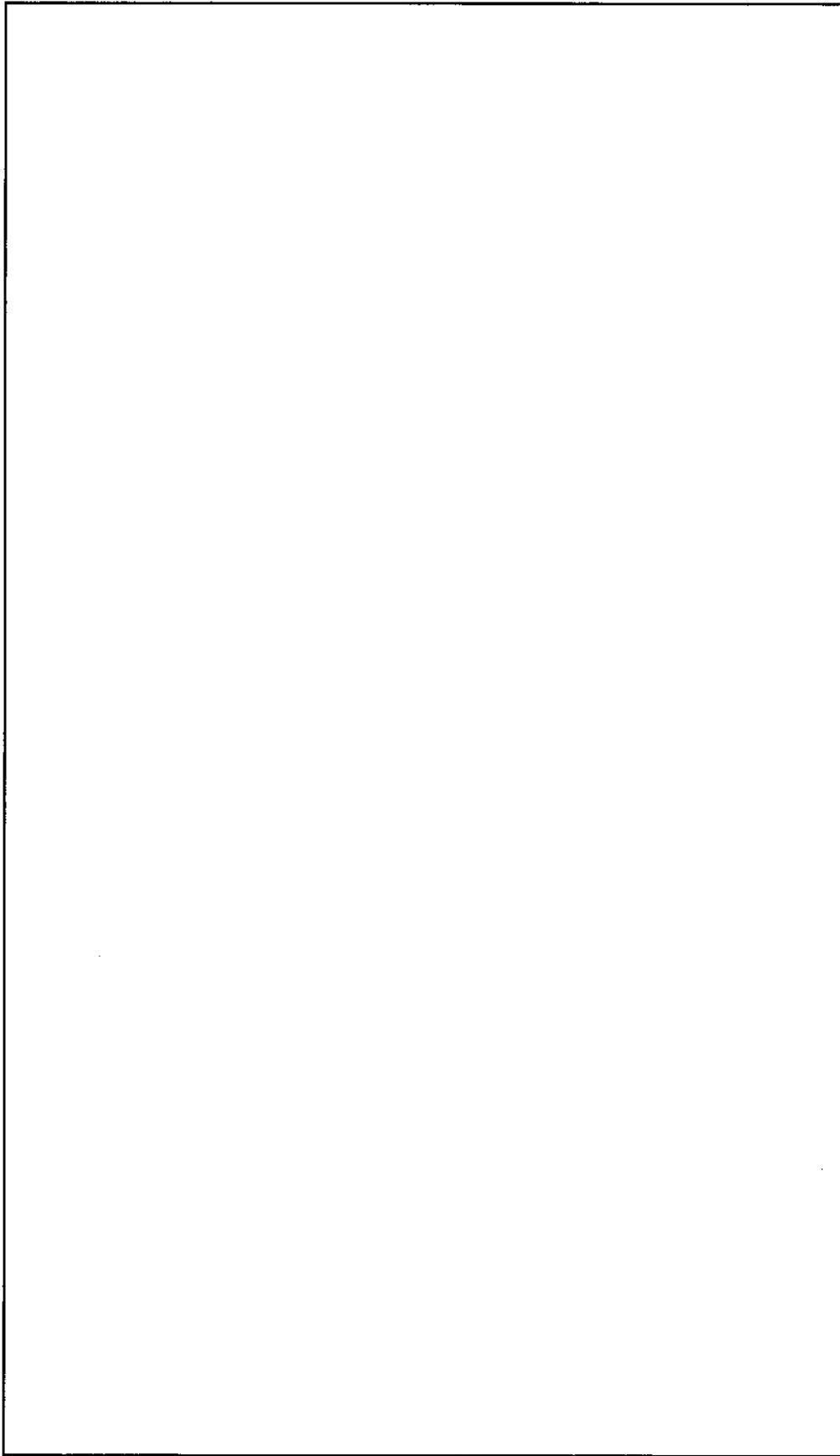


図(ロ)B-1 試験容器の熱電対取付け位置

(2/2)



図(ロ)B-2 燃料集合体の熱電対取付け位置



図(ロ)B-3 示温ラベルおよびペインツの取付け位置



図(口)B-4 NFI-V型輸送容器耐火試験温度測定結果

B.5.4 最大内圧

B.5.4.1 被覆管の最大内圧

(1) 計算条件

ここでは「B.5.3 輸送物温度」で得た集合体の温度 \square °C を安全側に \square °C とし
て被覆管に対する影響を評価する。

主要な計算条件は次のとおりである。

- a) 被覆管の内圧増加は温度上昇及び焼結体－被覆管空間体積変化に依存する。
- b) 被覆管の肉厚は直径に比較して非常に小さく \square 以下であるため、半径方向応力 σ_r の効果は小さく無視し得る程度である。従って薄肉円筒の関係により被覆管円周方向応力 σ_θ を求め、この σ_θ が耐力 σ_y を超えると被覆管は完全塑性体として変形すると仮定する。
- c) 被覆管の He ガスによる初期封入圧力は各燃料中最も高い \square Pa (\square °C) とし、また、燃料棒が短くプレナム体積の小さい条件とした、これにより増加する内圧は、保守的になる。
- d) 17×17 型タイプ 64 に対する評価は被覆管肉厚の薄い 17×17 型タイプ 57 の結果に包絡されることから、燃料棒仕様が共通である 14×14 型及び 15×15 型と 17×17 型タイプ 57 について評価する。

以下に被覆管温度上昇と焼結体－被覆管の空間体積変化による内圧増加より、被覆管に作用する円周方向応力を計算して、機械的健全性を評価する。

(2) 被覆管円周方向歪

被覆管の内圧を次式で計算する。

$$P = \frac{P_0 V_0}{V} \cdot \frac{(T + 273)}{(T_0 + 273)} \quad (1)$$

ここで

P : 最高温度での被覆管の内圧

P₀ : 初期内圧 \square Pa (燃料棒最大内圧 : 17×17 型タイプ 64)

V₀ : 初期焼結体－被覆管初期空間体積

V : 温度上昇後の焼結体－被覆管初期空間体積

T₀ : 0 °C

T : \square °C (燃料棒最高温度)

初期焼結体－被覆管空間体積は被覆管内体積から焼結体体積を差し引くと求まるので、以下の式で表せる。

$$V_0 = \frac{\pi}{4} (D_c^2 \cdot L_c - D_p^2 \cdot L_p) \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここで

- D_c : 被覆管内径 m (14×14 型、 15×15 型)
 m (17×17 型タイプ 57)
 L_c : 被覆管有効長 m (14×14 型、 15×15 型)
 m (17×17 型タイプ 57)
 D_p : 焼結体外径 (14×14 型、 15×15 型)
 (17×17 型タイプ 57)
 L_p : 燃料棒有効長 m (14×14 型、 15×15 型)
 m (17×17 型タイプ 57)

これらを(2)式に代入して 14×14、 15×15 型燃料棒と 17×17 型燃料棒の初期空間体積は、

$$V_0 = \text{} \text{ m}^3 \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$\text{} \text{ m}^3 \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

また °C に温度上昇したときの空間体積も(2)式と同様の式で求まる。

$$V = \frac{\pi}{4} \{ D_c^2(\Delta T) \cdot L_c(\Delta T) - D_p^2(\Delta T) \cdot L_p(\Delta T) \} \quad \text{-----} \quad (3)$$

ここで、

- $D_c(\Delta T)$: 温度上昇後の被覆管内径
 $L_c(\Delta T)$: 温度上昇後の被覆管有効長
 $D_p(\Delta T)$: 温度上昇後の焼結体外径
 $L_p(\Delta T)$: 温度上昇後のスタック長

これらの温度上昇後の寸法は以下の様にして求まる。

$$D_c(\Delta T) = D_c (1 + \alpha_{cd})$$

$$L_c(\Delta T) = L_c (1 + \alpha_{ca}) \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$D_p(\Delta T) = D_p (1 + \alpha_p)$$

$$L_p(\Delta T) = L_p (1 + \alpha_p)$$

ここで α_{cd} 、 α_{ca} 、 α_p はそれぞれ被覆管の径方向熱膨張率、被覆管の軸方向熱膨張率、焼結体の熱膨張率であり MATPRO の式より以下のように表せる。

$$\alpha_{cd} = \boxed{} \cdot T \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\alpha_{ca} = \boxed{} \cdot T \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\alpha_p = \boxed{} \cdot T^3 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

(5)式より $\boxed{} \text{ } ^\circ\text{C}$ 時の熱膨張を求め(4)式に代入すると

$$D_c(\Delta T) = \boxed{} \text{ m} \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$\boxed{} \text{ m} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

$$L_c(\Delta T) = \boxed{} \text{ m} \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$\boxed{} \text{ m} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

$$D_p(\Delta T) = \boxed{} \text{ m} \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$\boxed{} \text{ m} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

$$L_p(\Delta T) = \boxed{} \text{ m} \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$\boxed{} \text{ m} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

これら熱膨張後の寸法を(3)式に代入すると熱膨張後の空間体積は

$$V = \boxed{} \text{ m}^3 \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$\boxed{} \text{ m}^3 \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

以上より求めた V_0 、 V を(1)式に代入すると $\boxed{} \text{ } ^\circ\text{C}$ に昇温後の被覆管内圧はそれぞれ

$$P = \boxed{} \text{ Pa} \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$\boxed{} \text{ Pa} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

となる。

ここで大気圧が 1 気圧($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$)とすると、被覆管の内外差圧は、

$$\boxed{} \text{ Pa} \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$\boxed{} \text{ Pa} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

となる。

(3) 被覆管の応力

内圧が掛った場合被覆管の周方向応力は薄肉円筒の式より以下の様に表せる。

$$\sigma = \frac{PD}{2t}$$

ここで

σ : 周方向応力

P : 内外差圧 Pa (14×14 型、 15×15 型)

Pa (17×17 型タイプ 57)

D : 被覆管内径 m (14×14 型、 15×15 型)

m (17×17 型タイプ 57)

t : 被覆管肉厚 m (14×14 型、 15×15 型)

m (17×17 型タイプ 57)

これらを代入して

$$\sigma = \text{ MPa} \quad (14 \times 14 \text{ 型、 } 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$= \text{ MPa} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57)$$

となる。これら求めた周方向応力は、安全側に °C 時の被覆管耐力である MPa と比較しても大変小さく、被覆管の健全性は保たれる。

尚、被覆管の健全性は °C 以上の温度まで保たれる事が実験⁽⁸⁾により判っている。

B.5.4.2 輸送容器の最大内圧

(1) 外筒－内筒間の最大内圧

本輸送容器には外筒に 28 個の可融栓が設けられており外筒－内筒間の内圧は上昇しない。また耐火試験後の検査でも可融栓は全て正常に機能していたことが確認された。

(2) 容器内外圧差

耐火試験ではスペーサーが燃焼するために上・下側ケースに隙間が出来た。このため容器の気密性が損なわれ内圧増加はない。

B.5.5 最大熱応力

輸送容器全体が 800 °C まで加熱されても、容器の板厚は最大でも mm 程度と薄く、材質も金属であるため、部材内に大幅な温度差は生じない。したがって臨界評価上問題となるような大幅な変形は発生しない。耐火試験後の検査では、上・下側ケースの中央で外側にふくれるように mm の変形を生じたが、これは臨界評価上安全側となる変形である。

B.5.6 結果の要約及びその評価

輸送物の熱解析を実施した。

一般の試験条件では最低温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ から最高温度 $\square\text{ }^{\circ}\text{C}$ について評価し、問題ないことを確認した。特別の試験条件では、9 m 水平落下（上側ケース下向き）落下試験 I 及び水平 1 m ターゲット落下により輸送容器が変形した状態で、引き続き耐火試験を行う場合について評価を行った。耐火試験ではスペーサが焼損して輸送容器の気密性が損なわれるが、輸送容器の材質であるステンレス鋼（SUS304）の融点は $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上であり $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ において原型が損なわれることはない。

また、中性子吸収材であるボロン入りステンレス鋼の融点は $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上であり、安全側に容器内筒温度 $\square\text{ }^{\circ}\text{C}$ としても健全性が損なわれることはない。

被覆管の健全性が保たれる温度は $\square\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、評価結果の $\square\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度では酸化も少なく、またこの温度による燃料棒内圧増加によって発生する周方向応力は最大でも $\square\text{ MPa}$ となり解析基準 $\square\text{ MPa}$ に比較して小さいため、燃料棒の密封性は維持される。したがって(ロ)一E 章の臨界解析では燃料棒内へ水の浸入はないものとして評価した。

なお、輸送容器の総合的評価を表(ロ)B-6に示す。

表(ロ)B-6 熱解析結果

条件	項目	解析項目	解析基準値	解析結果	評価
一般の試験条件	1. 最高温度	ケース表面温度	—	<input type="text"/> °C	健全
	2. 最低温度	最低使用温度	—	-40 °C	健全
	1) 輸送容器	"	—	-40 °C	健全
	2) ガスケット	輸送容器内圧	—	<input type="text"/> Pa	—
	3. 最大内圧	燃料棒内圧	—	<input type="text"/> Pa	—
	1) 輸送容器				
特別の試験条件	1. 最高温度	被覆管温度	<input type="text"/> °C	<input type="text"/> °C	燃料棒の密封性は維持
	2. 最大内圧	被覆管周方向応力	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	

参照資料

- 1) (口)-B.1 参照文献一覧表
- 2) (口)-B.2 NFI-V 型輸送容器 耐火試験結果報告書

参考資料 (ロ)・B.1 参考文献一覧表

- (1) 伝熱工学資料 37P, 日本機械学会, 改訂第3版
- (2) 化学便覧 応用編 979P, 日本化学会, 改訂2版
- (3) シリコーンゴム 日本ゴム協会誌, 第46巻第4号(1973)
- (4) 平成2年度「新燃料輸送容器の安全性実証試験」事業成果報告書 59P, 株式会社三菱総合研究所

参考資料(口)・B.2

NFI-V 型輸送容器 耐火試験結果報告書

参(口)B.2-1

目 次

1. はじめに
2. 試 験
 - 3.1 試験場所及び試験日時
 - 3.2 試験体
 - 3.3 落下試験
 - 3.4 落下試験後の状況
 - 3.5 耐火試験方法
 - 3.6 耐火試験結果
3. まとめ

添 付 資 料

- 添付 1： 落下試験台の説明
- 添付 2： 耐火試験炉の説明
- 添付 3： 試験写真集

1. はじめに

本報告書は、NFI-V型輸送容器の原型容器用いて実施した落下試験Ⅰ、Ⅱ及び耐火試験について、試験状況及び試験後の容器の検査結果をまとめたものである。

2. 試験

2.1 試験場所及び試験日時

(1) 落下試験について

試験場所

試験日時

--

(2) 耐火試験について

試験場所

試験日時

--

2.2 試験体

落下試験Ⅰ、Ⅱ及び耐火試験に用いた輸送物は、次の点を除いて実際に燃料集合体を輸送する場合と同じである。

(1) 収納物の相違点

試験容器には模擬燃料集合体 (図(ロ)B 参 2-1) と模擬重量体 (図(ロ)B 参 2-2) を 1 体ずつ収納した。なお、模擬燃料集合体は、 UO_2 ペレットの代わりに重量を模擬したタングステン銅ペレットを用いている点を除き、材質・寸法等は実際の燃料集合体と同じである。

(2) 試験実施のための相違点

熱電対を容器内部に取り付けて配線を引出すために、容器端部に貫通孔を設けた。また脚部に吊下げ用の穴を追加している。

2.3 落下試験

9m 水平落下試験及び 1m 水平ターゲット落下試験を行った。容器を吊上げる際にはシャックル、ワイヤ等を使用し、容器落下後にシャックル等が容器上に落下しないように考慮した。

(1) 9m 水平落下 (上側ケース下向き)

上側ケース下向きとして、水平に落下させた。

姿勢の制御には脚部の吊穴 (4ヶ所) を用いた。

(2) 1m 水平ターゲット落下（上側ケース下向き）

(1)と同様にして、水平に落下させた。

2.4 落下試験後の状況

落下試験中には、カメラ及び8ミリビデオを用いて撮影を行った。その写真を付録にまとめた。以下にその写真を参考にしながら説明する。

落下試験前の試験容器を写真(ロ)B 参 2-1に示す。

(1) 9m 水平落下（上側ケース下向き）

(a)上側ケースの衝突面が全体に均一に□mm 変形した。(写真(ロ)B 参 2-2)

(b)容器中央の下側ケースに歪みが生じた。(写真(ロ)B 参 2-3)

(c)ボルト6本にゆるみが生じたものの、外れたものはなかった。

(d)スペーサーのウレタンゴムが容器側面で少しはみ出した。

(2) 1m 水平ターゲット落下

(a)ターゲットが当たった所は、9m 水平落下の歪みも含めて □mm の変形を生じた。また、リブも少し変形したが、貫通はしていない。(写真(ロ)B 参 2-4)

(b)フランジ締付けボルト7本にゆるみが生じたものの、外れたものはなかった。

(3) 容器の内部検査

(a)ストロングバッグ固定用ボルトが全部外れた。一部はサポートプレートの下にもぐり込んだ。(写真(ロ)B 参 2-5)

(b)模擬燃料集合体とリブとの衝突の跡があった。(写真(ロ)B 参 2-6)

(c)模擬燃料集合体上下方向のUサポートは、くの字に曲った。また、集合体は、中央に大きな歪みを生じた。(写真(ロ)B 参 2-7)

(d)ショックマウントが塑性変形した。(写真(ロ)B 参 2-8)

(e)弓型クランプを固定するボルトが切断された。(写真(ロ)B 参 2-9)

(f)下部ゲートの角が上側ケースの内筒に当り、小さな穴があいた。外筒までは貫通していない。(写真(ロ)B 参 2-10)

(g)弓型クランプにある、Uサポート固定用ボルトのネジ穴溶接部が外れた。(写真(ロ)B 参 2-11)

(h) ボロン入り SUS 板は変形したが、所定の位置から外れることはなかった。

(写真(ロ)B 参 2-12)

(i) サポートプレートの止めビスが、重量体側で多く破損した。(写真(ロ)B 参 2-13)

2.5 耐火試験方法

落下試験終了後、上側ケースをあけて熱電対を取付けた。

耐火試験には、添付 1 に示す仕様の熱処理炉を用いた。

試験は炉内に空台車を入れた状態で \square °C まで予熱し、予熱した台車に容器を乗せて炉内に入れた後、炉内温度が \square °C になるように制御した。

2.6 耐火試験結果

(1) 熱電対による温度測定

輸送容器と収納物に熱電対を計 20 個 (図(ロ)B 参 2-3~図(ロ)B 参 2-5 参照) 取り付け、耐火試験中の温度変化を測定した。この温度は 1 分毎に記録しており、7 箇所の測定点の温度は、試験中チャートに出力した。一方、炉の雰囲気温度は、さらに別の熱電対で測定している。代表部分の温度変化を図(ロ)B 参 2-6 から図(ロ)B 参 2-9 に示す。

温度測定によれば、最高温度は外筒表面が \square °C (熱電対 5)、内側で \square °C (熱電対 11)、燃料集合体 \square °C (熱電対 17) である。ただし、熱電対 12 は図(ロ)B 参 2-8 を見ればわかるように温度上昇が他の内筒表面温度の上昇に比べて著しく速く \square °C まで上昇している。これは、熱電対 12 がフランジ接合部の O リング横にあり、試験開始まもなくフランジ部のスペーサー (ウレタンゴム) が燃料したことにより、すき間が生じ熱電対 12 は外部雰囲気にさらされたためと考えられる。

表(ロ)B 参 2-1 に耐火試験中に熱電対により測定された温度変化について、各測定点での最高温度を示す。

(2) 示温ラベル及び示温ペイントによる温度測定

今回の耐火試験では収納物の表面温度を測定するために、熱電対だけではなく、非可逆性示温ラベル及び示温ペイントを用いた。示温ラベルは、融点を利用しており、瞬時に反応して変色するが、示温ペイントは顔料の熱的化学変化を利用したもので、変色温度は加熱時間に依存する。測定位置を図(ロ)B 参 2-10 に示す。

示温ラベルにより、 \square °C~ \square °C の範囲で、示温ペイントにより \square °C~ \square °C の範囲で収納物表面温度をおおまかに知ることができる。以下に測定の

結果を表(ロ)B 参 2- 2に示す。

(3)内部状況の検査

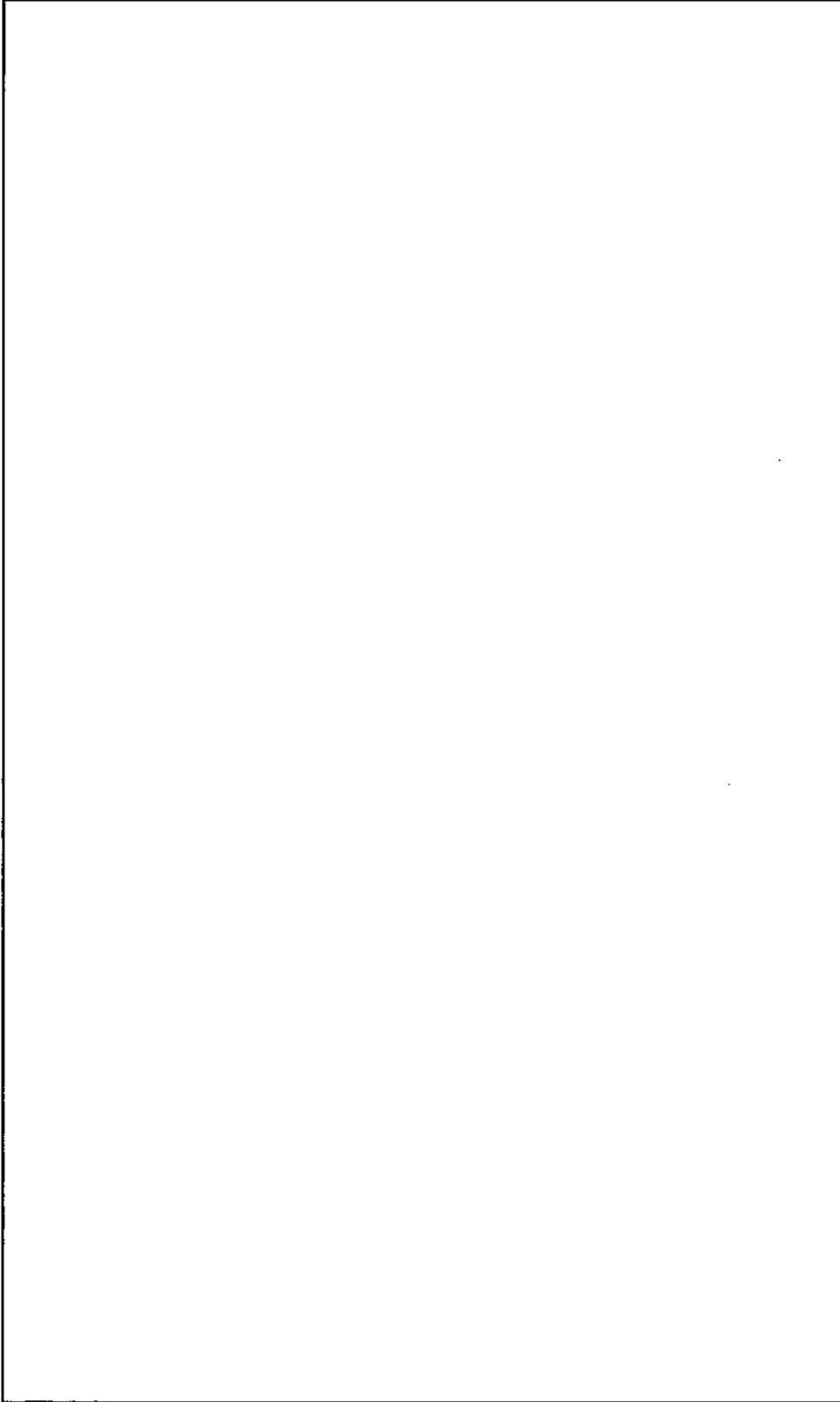
取り出し直後の容器外観を写真(ロ)B 参 2- 14～写真(ロ)B 参 2- 16に示す。

耐火試験後、一部ボルトを切断して、上側ケースをあげて内部を検査した。
試験後の検査結果を以下にまとめる。

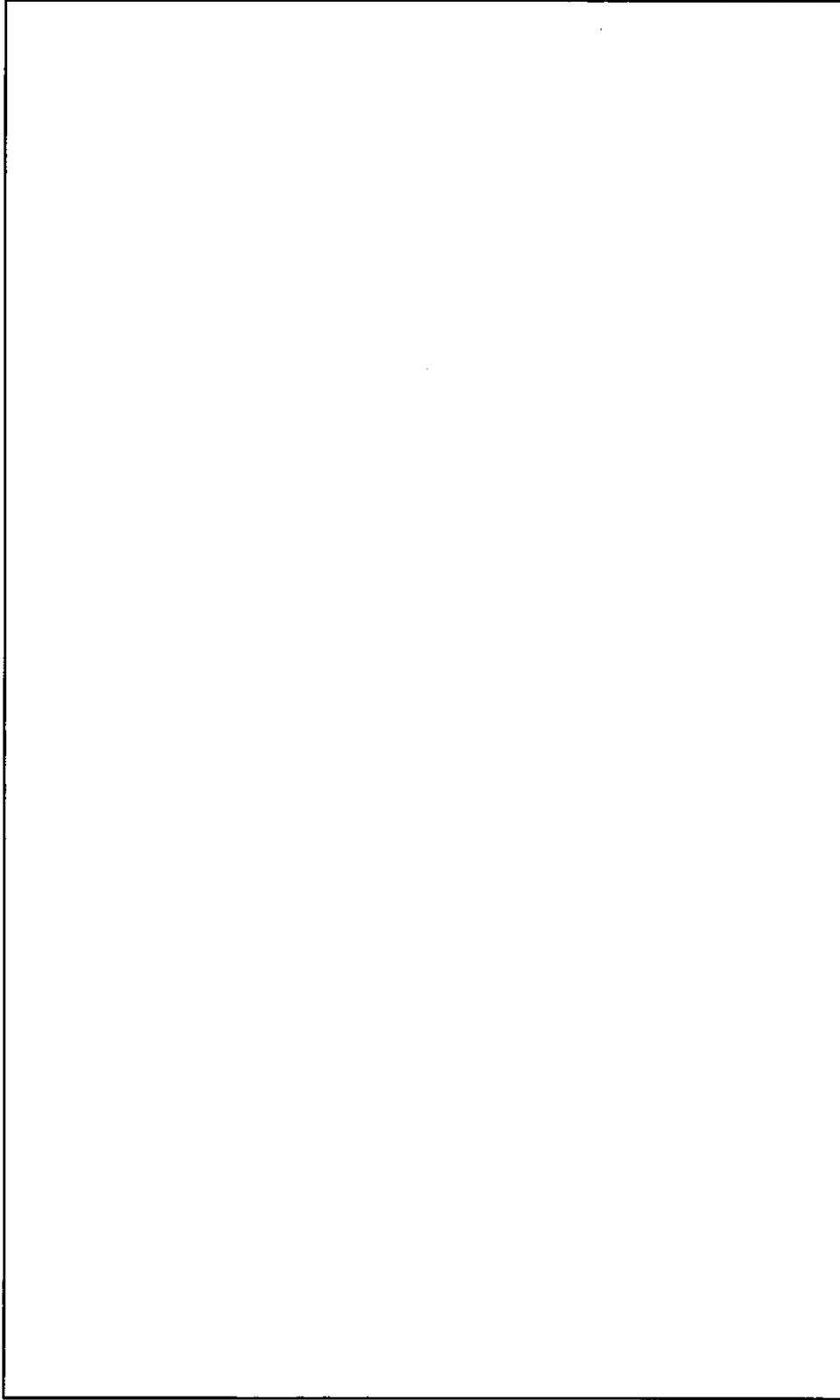
- (a)容器のボルトは44ヶ所すべて変形しているが、外れたものはなかった。(写真(ロ)B 参 2- 17)
- (b)容器の位置決めピンも変形しているが、外れたものはなかった。
- (c)スキッド及びスペーサーは、すべて燃焼し、試験容器外部表面に白色粉末として付着していた。(写真(ロ)B 参 2- 18)
- (d) ガスケットもすべて燃焼したが、所定の位置に粉末として残っていた。(写真(ロ)B 参 2- 19)
- (e) 熱電対の取出し貫通孔は、試験前に施工したとおり断熱材でつまっていた。(写真(ロ)B 参 2- 20)
- (f) ショックマウントはすべてはがれていた。(写真(ロ)B 参 2- 21)
- (g) リリーフバブルの内容物が容器内にはみ出していたが、機能的には問題ない。(写真(ロ)B 参 2- 22)
- (h) 可融栓は、すべて正常に機能していた。上側ケース頂部の可融栓のみが完全には開放されずにハンダの酸化物が残存していた。(写真(ロ)B 参 2- 23)
- (i) Uサポート（支持格子押さえ板）に貼り付けたゴムは接着剤がはがれていたがゴムの変質は認められない。(写真(ロ)B 参 2- 24)
- (j) 耐火試験の前後で容器は上、下側ケースとも中央部で、外側にふくれるように□mm変形した。
- (k) 収納物は、うすく変色したが、耐火試験前と外観はほとんどかわりない。(写真(ロ)B 参 2- 25)



図(ロ)B 参 2-1 模擬燃料集合体の構造



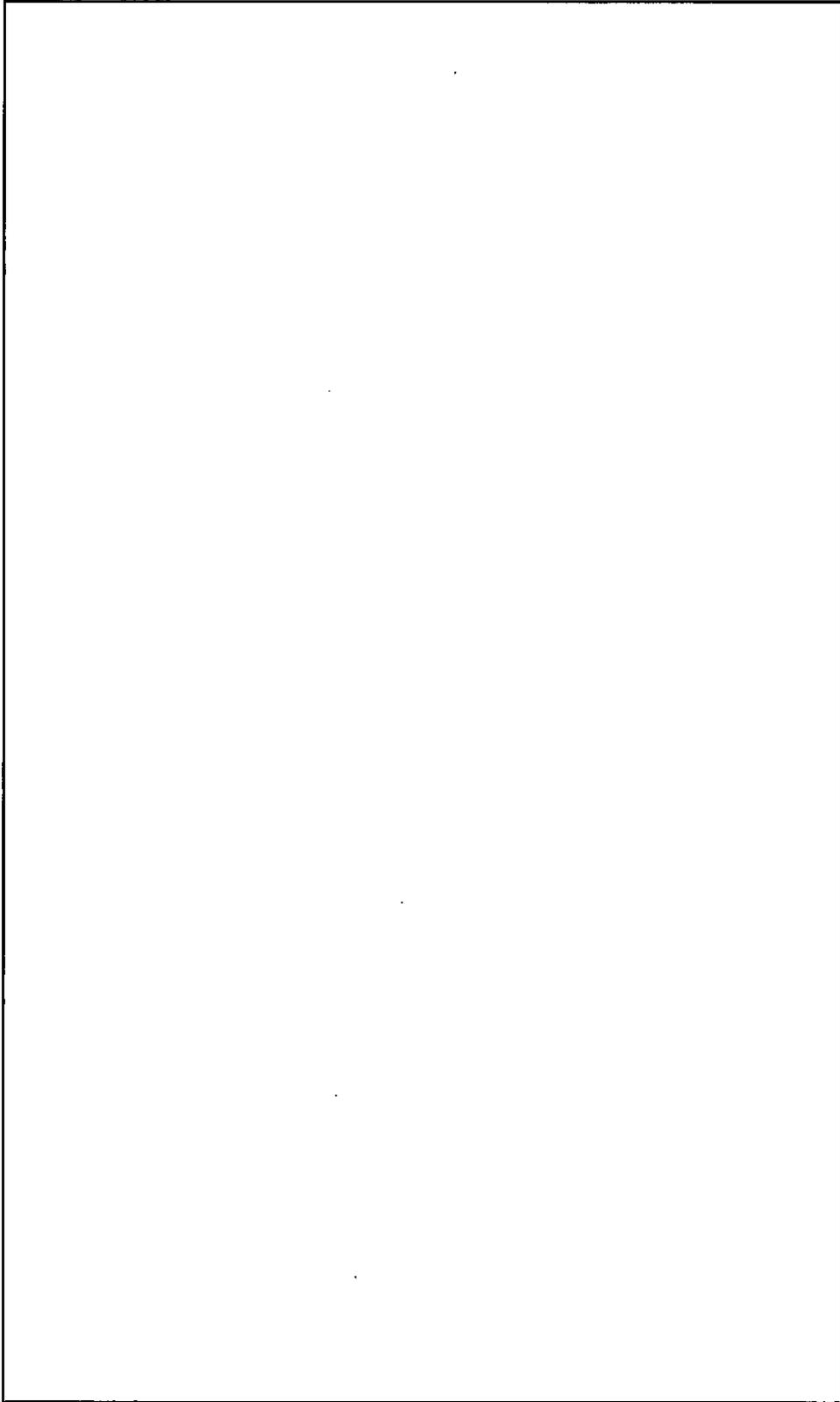
図(ロ)B 参 2-2 模擬重量体の構造



図(ロ)B 参 2-3 試験容器の熱電対取付け位置



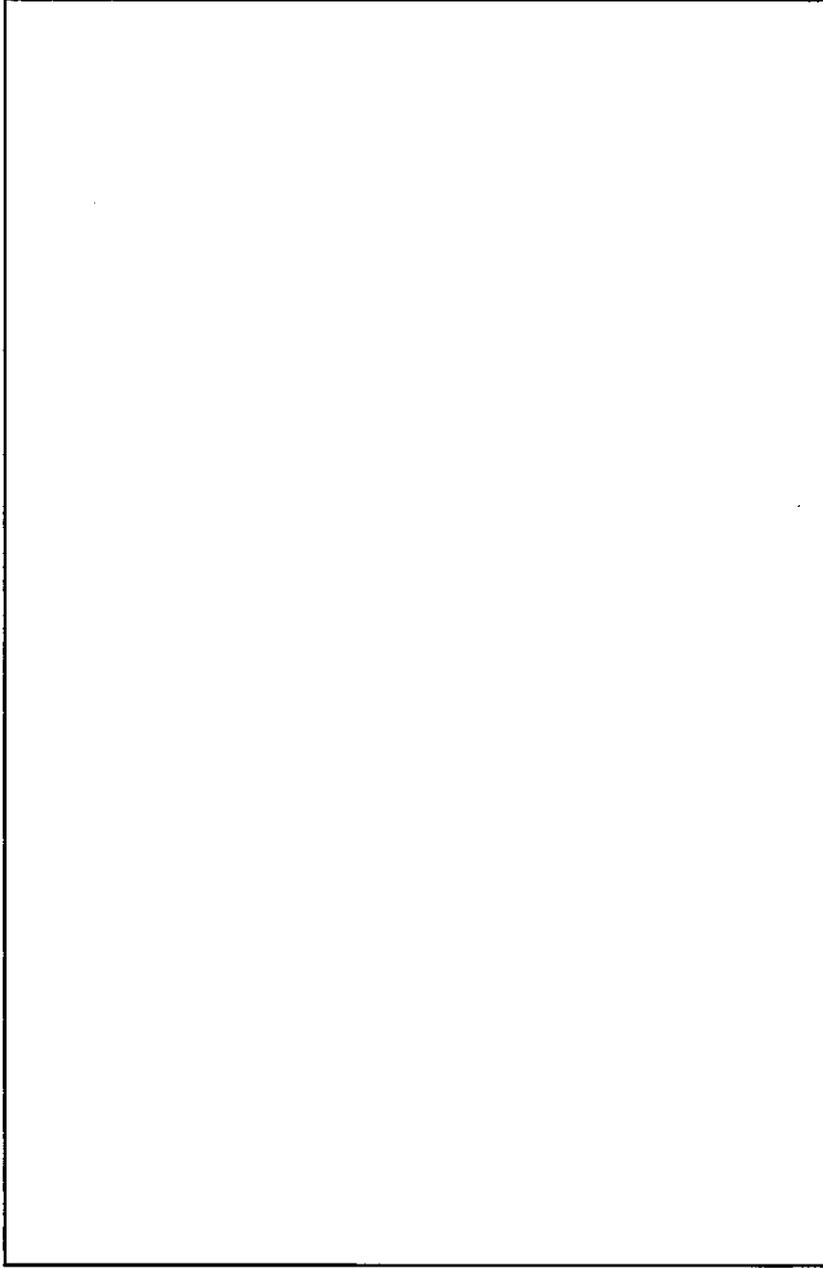
図(ロ)B 参 2-4 フランジ部の熱電対取付け位置



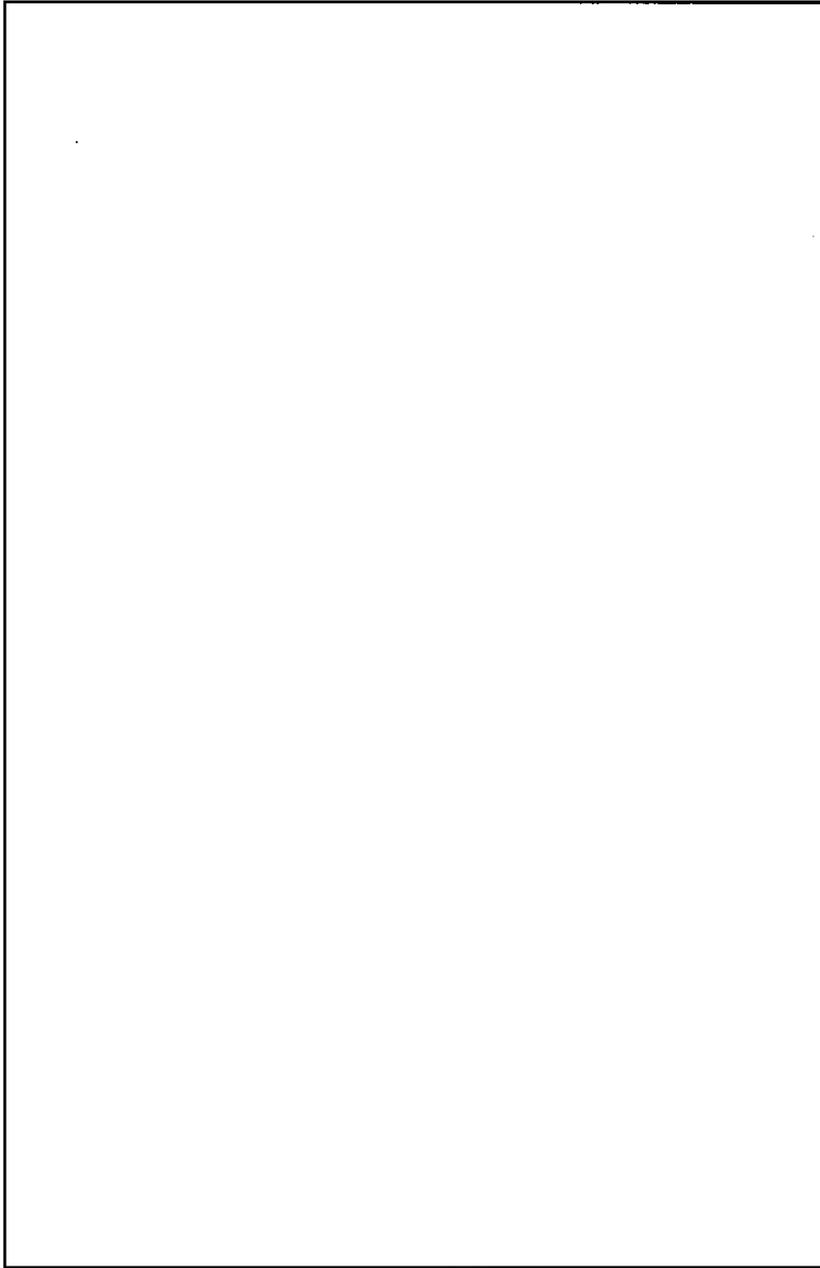
図(ロ)B 参 2-5 模擬燃料集合体の熱電対取付け位置

表(口)B 参 2-1 最高温度

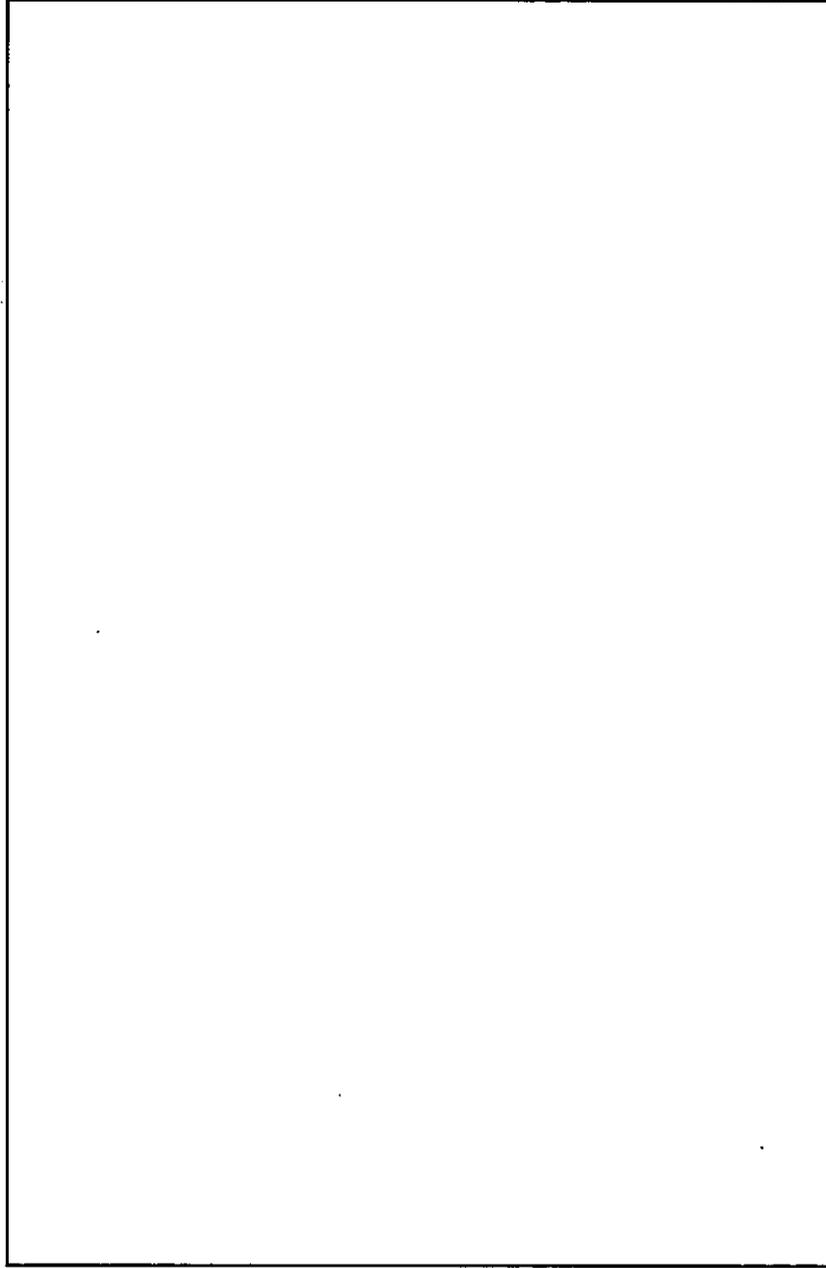
取付番号	最高温度 (°C)	試験開始時間 (分)	備考
①			最低: <input type="text"/> °C (注)
②			最低: <input type="text"/> °C (注)
③			
④			
⑤			
⑥			
⑦			
⑧			
⑨			
⑩			
⑪			
⑫			
⑬			
⑭			
⑮			
⑯			参考値
⑰			
⑱			
⑳			



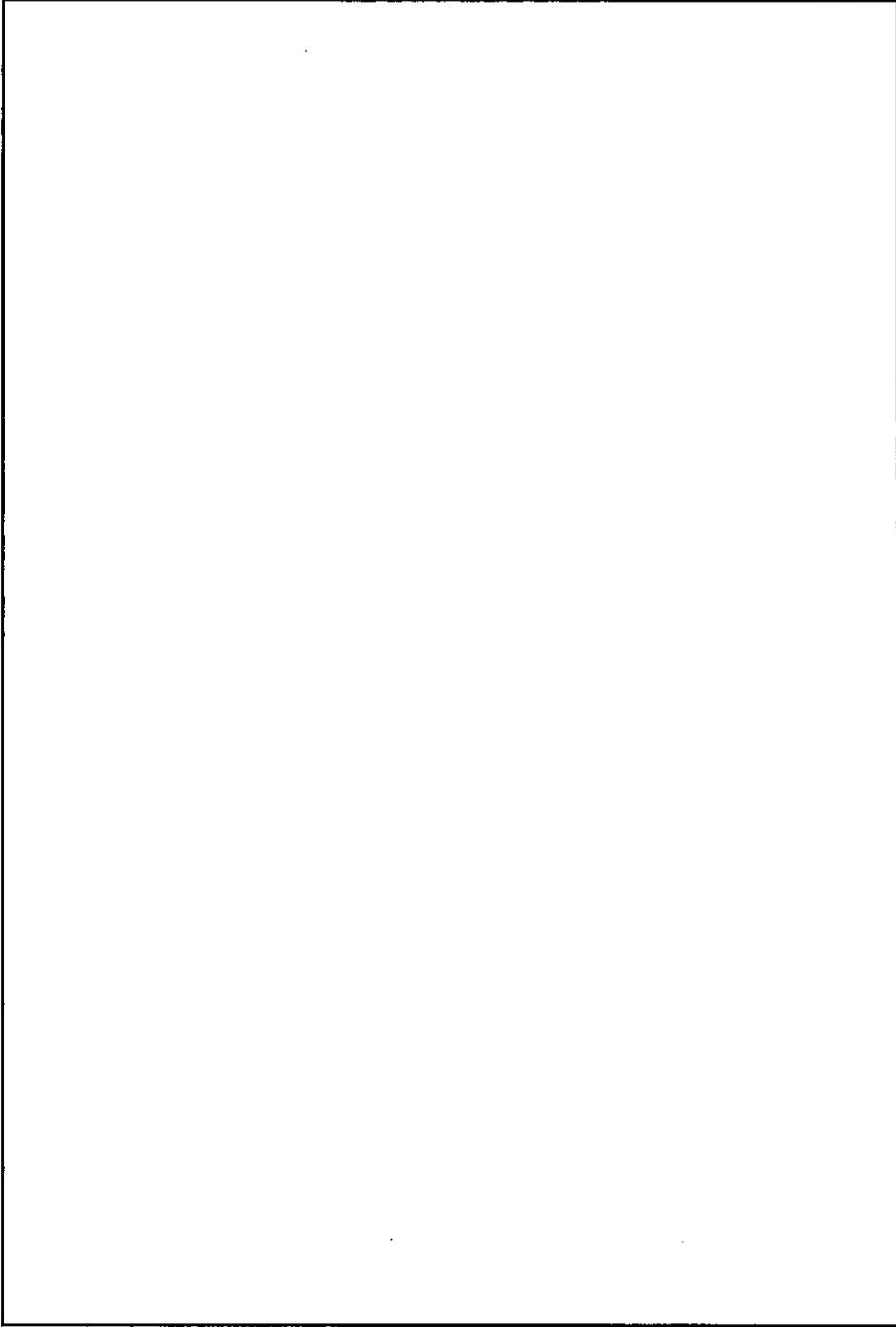
図(ロ)B 参 2-6 耐火試験中の温度変化 (炉内雰囲気)



図(ロ)B 参 2-7 耐火試験中の温度変化 (外筒表面)



図(ロ)B 参 2-8 耐火試験中の温度変化 (内筒表面)



図(ロ)B 参 2-9 耐火試験中の温度変化 (集合体表面)



図(ロ)B 参 2-10 示温ラベルおよびポイントの取付け位置

表(ロ)B 参 2-2 示温ラベル及びペイントによる測定結果

測定具の種類と位置	測定された温度範囲
H ₁	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>
H ₂	
H ₃	
H ₄	
P ₁	
P ₂	
P ₃	
P ₄	

4. まとめ

- (1) 二重構造の容器のため、外筒表面最高温度が□□℃であったが、内筒表面では、□□℃、集合体表面では、□□℃だった。
- (2) 熱電対 12 はスペーサーが消失して生じた隙間のために外部雰囲気さらされ、高温度を示した。
- (3) 外筒フランジに取付けられたボルトは高温になって上、下側のケースの熱応力により変形を生じたが、スペーサーが焼失してできた隙間により応力を逃すことができ、外れることはなかった。
- (4) 可融栓は、残存物が栓を塞いでいるのがいくつかあった。しかし、これは容器内圧が小さく、勢いよくガスが吹き出なかったためか、あるいは可融栓の数が多すぎるために、すべての栓が開放される必要がなかったものと考えられる。
- (5) 容器は中央部分が□mm ふくらんだ。また容器の機能的な損傷はなかった。

落下試験台の説明資料

1. 落下試験台

(1) 所有者

--

(2) 落下試験台の概要

基準 (1973 年安全輸送規則)		当該落下試験台
IAEA(708)	試験台は平らな面であって、供試物の衝突の際の変位又は、変形に対する抵抗の増加により供試物の破損を著しく増大するものではないこと。	落下試験台の上面は圧延仕上鋼を用いており、平面度は□mm以上の基準で製作しているため、供試物の破損を増大させるものではない。
ADVISERY(701)	(1)供試物の 10 倍以上の質量のコンクリートブロック上に鋼板を置いたもの。	(1)鋼板下のコンクリートは、□×□×□m のブロックで、約□Ton である。 このため、供試物は □Ton まで許容される。
	(2)鋼板は 1.25cm 以上の厚さであること。	(2)使用鋼板は、□cm である。
	(3)コンクリートに密着するように、ウェットフローであること。	(3)コンクリートと鋼板の間は無収縮モルタル (厚さ □mm) を注入して密着させている。
	(4)ターゲットはどの側においても、供試物より 500mm 以上あること。	(4)鋼板寸法は、□×□m であり、供試物は最大寸法 □m まで許容される。

--

落下試験台設置断面図 (寸法: □ mm)

耐火試験炉の説明

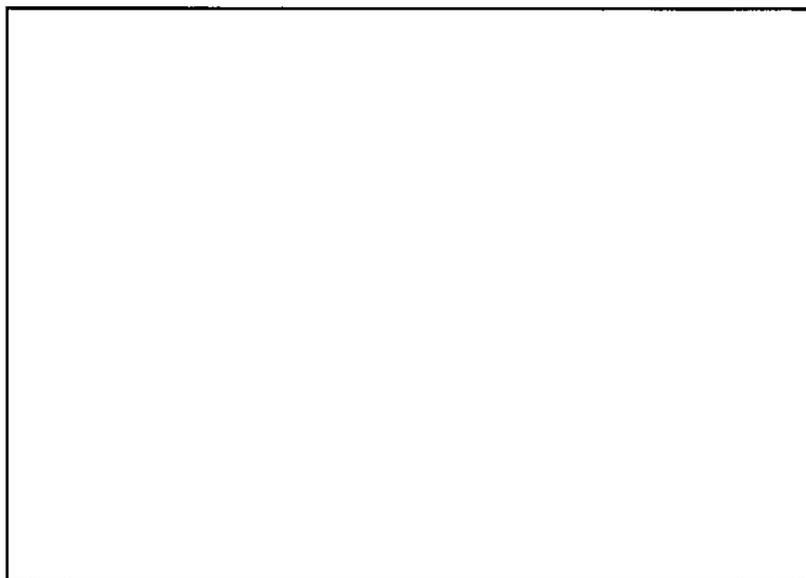
(1)所有者

(2)耐火試験用炉の概要

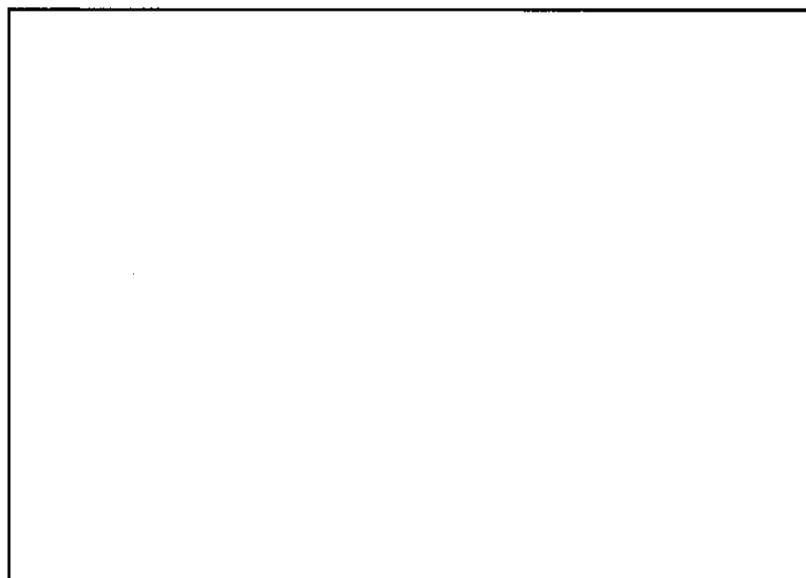
- i) 概略仕様
- 型式
- 炉内寸法
- 有効寸法
- 最大荷重
- 最高温度
- 使用燃料
- バーナ型式
- 温度制御

- ii) 空台車装入状態で 800℃まで昇温時間約 30 分。3 時間保持後の温度公差
□℃以内
- iii) 台車を 2 台備え、交換、装入することで効率的に作業を行える。

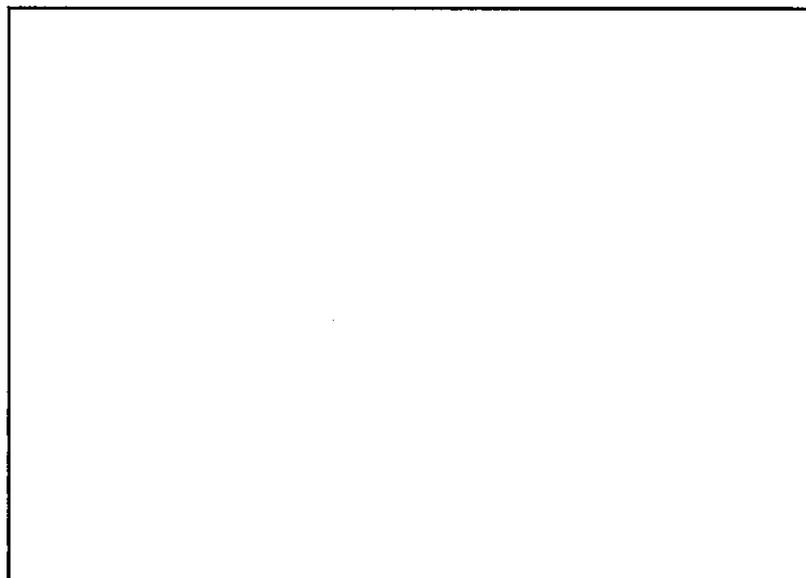
写真(口)B 参 2-1



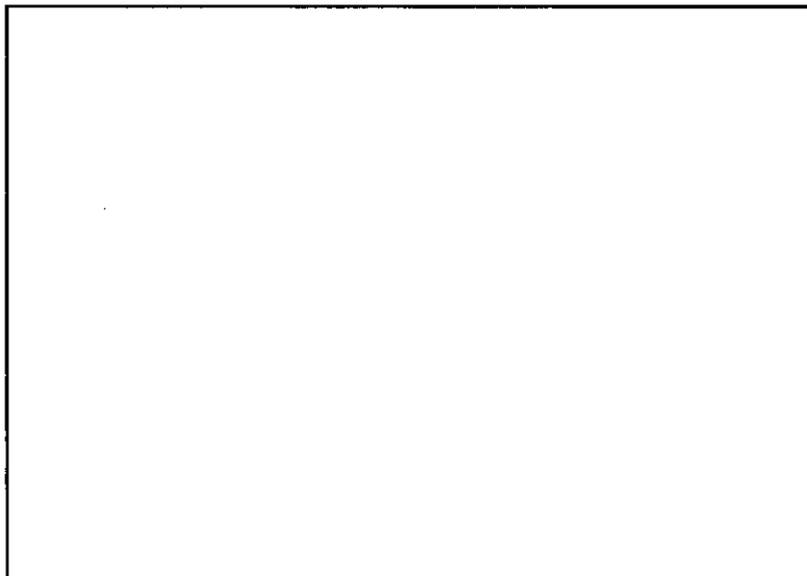
写真(口)B 参 2-2



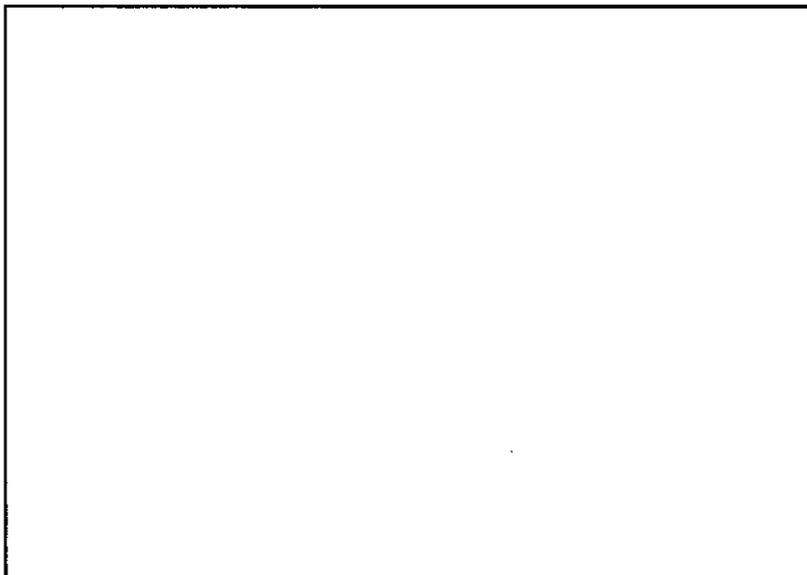
写真(口)B 参 2-3



写真(口)B 参 2-4



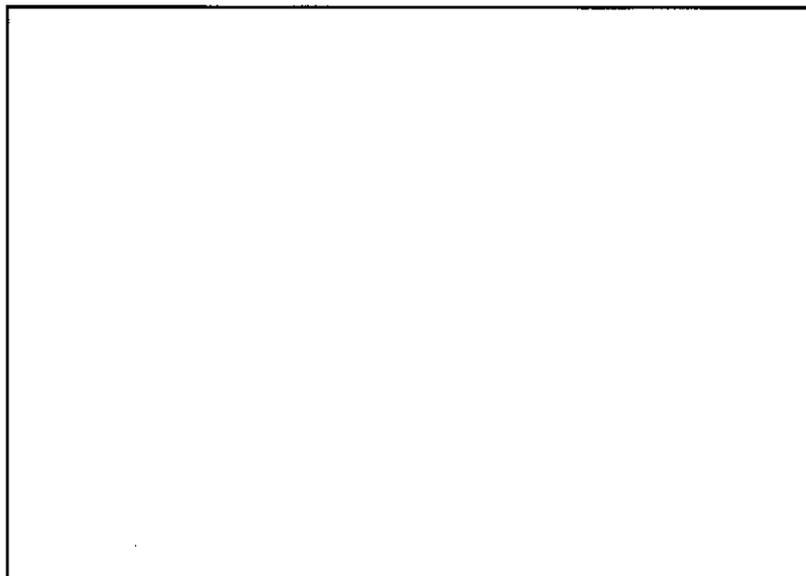
写真(口)B 参 2-5



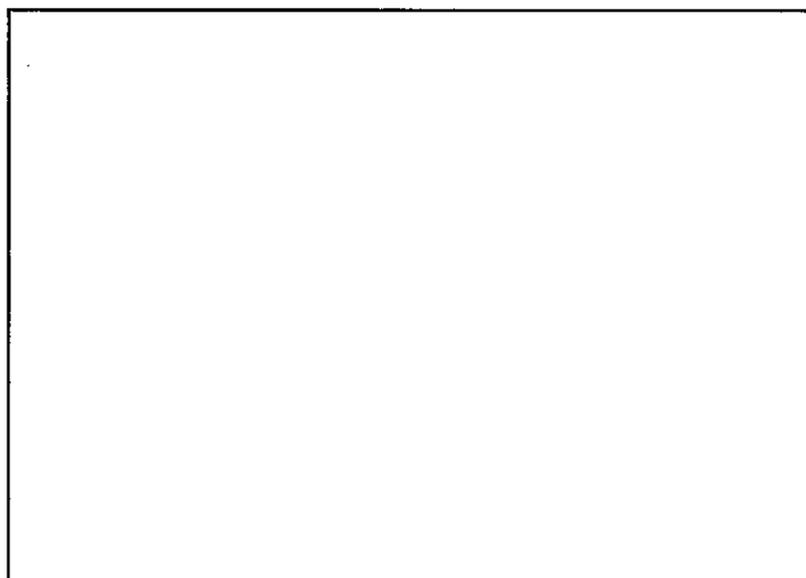
写真(口)B 参 2-6



写真(口)B 参 2-7



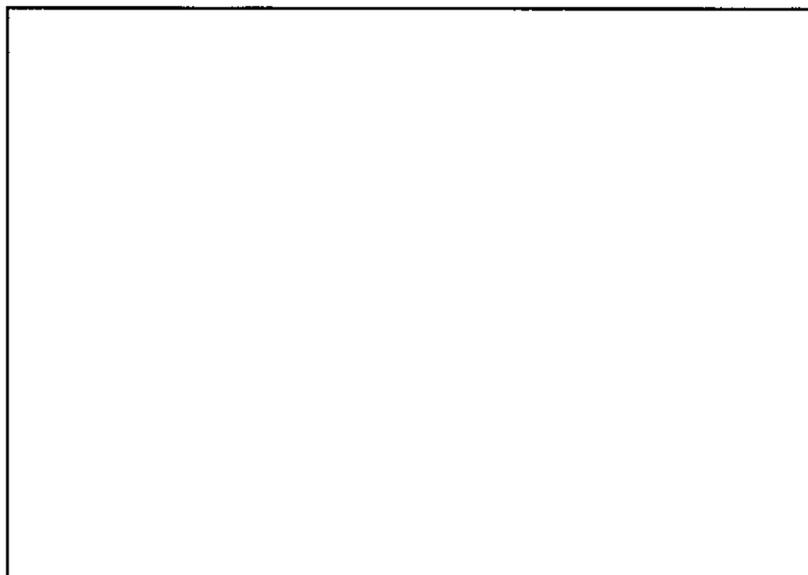
写真(口)B 参 2-8



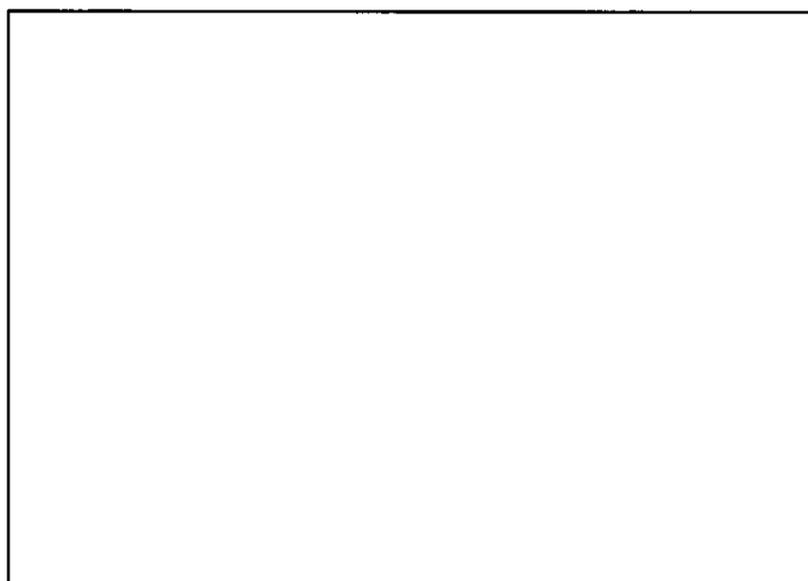
写真(口)B 参 2-9



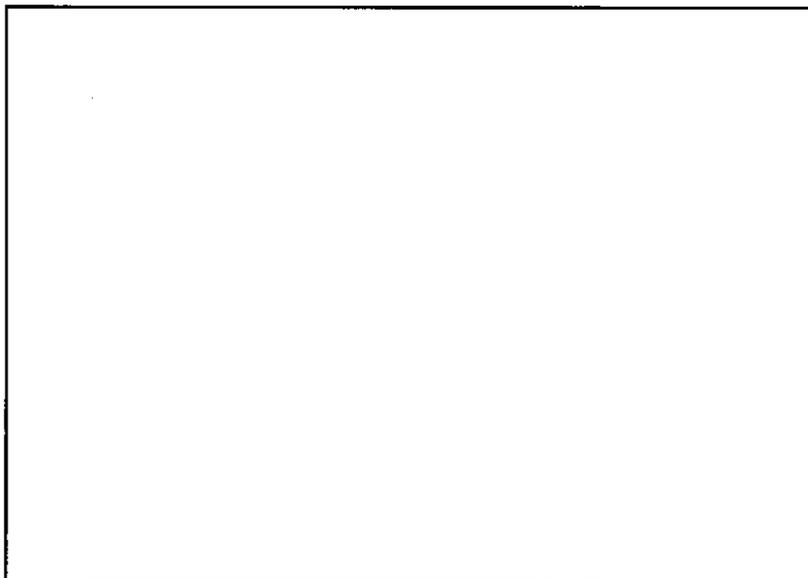
写真(口)B 参 2- 10



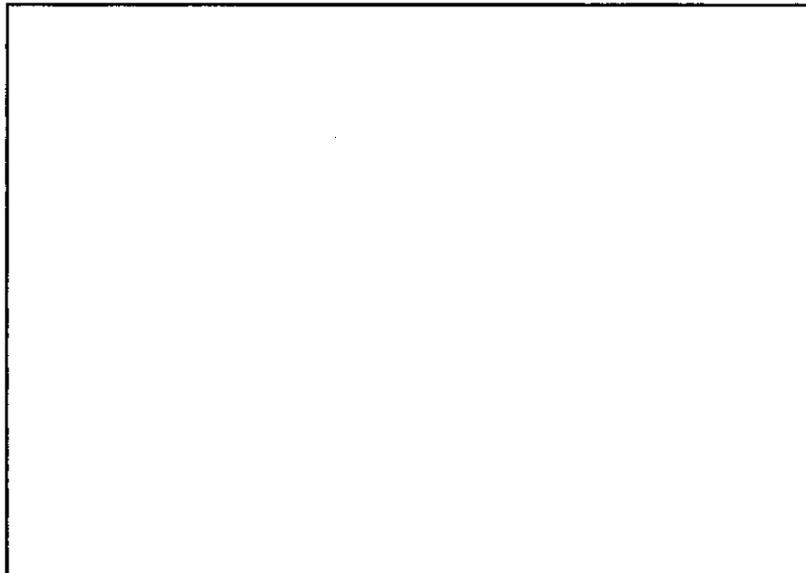
写真(口)B 参 2- 11



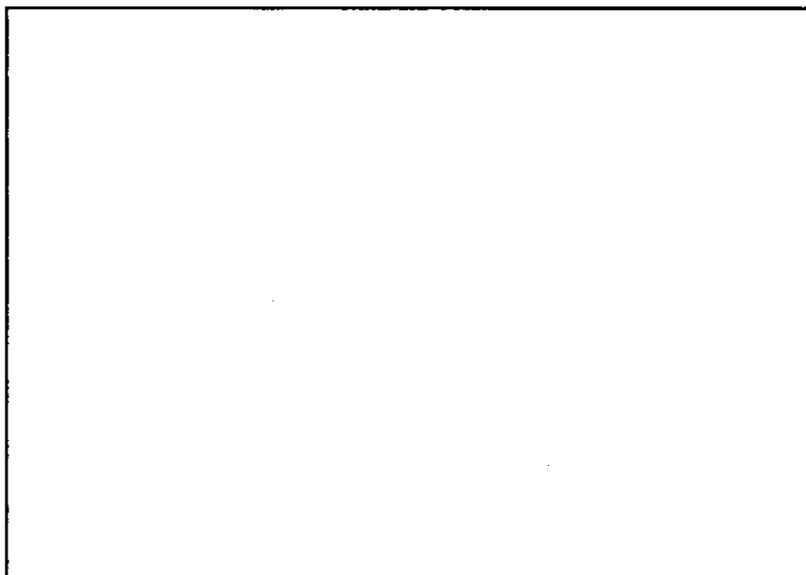
写真(口)B 参 2- 12



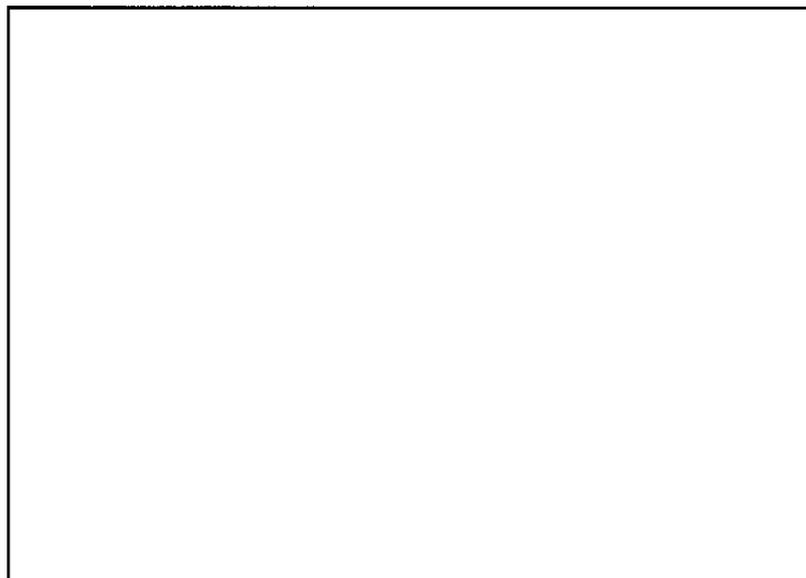
写真(口)B 参 2-13



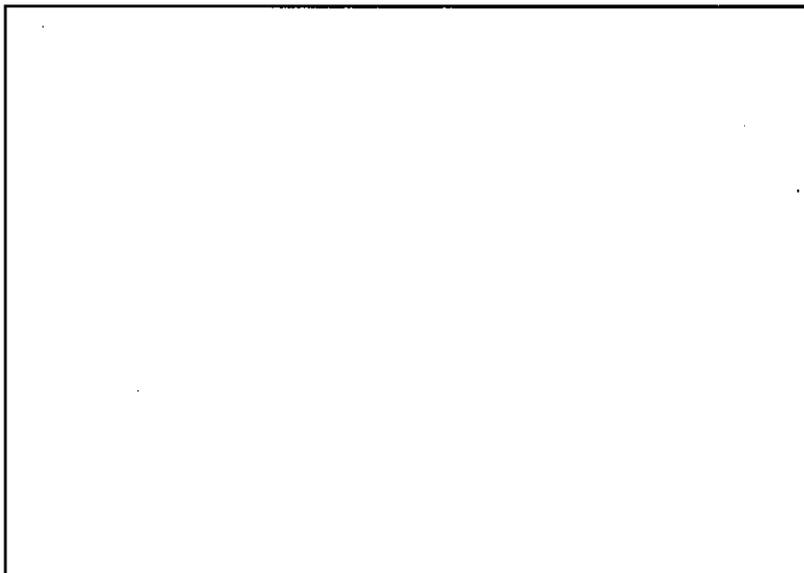
写真(口)B 参 2-14



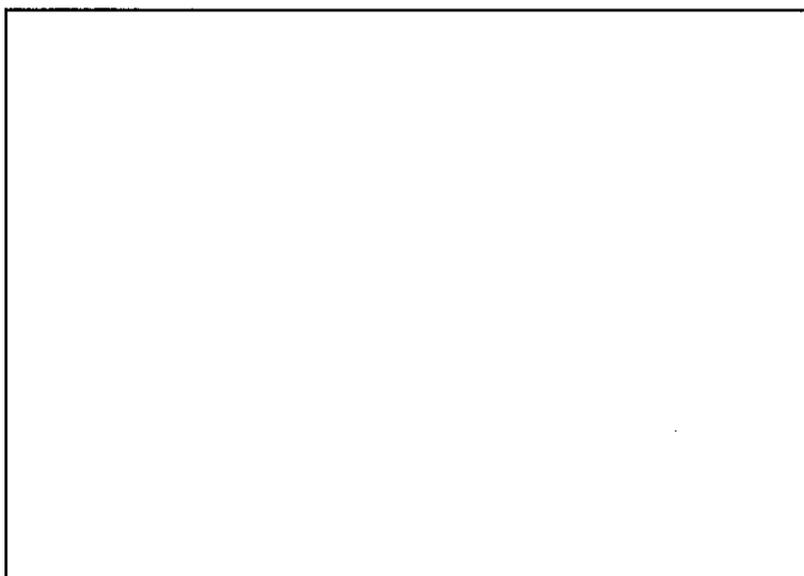
写真(口)B 参 2-15



写真(口)B 参 2- 16



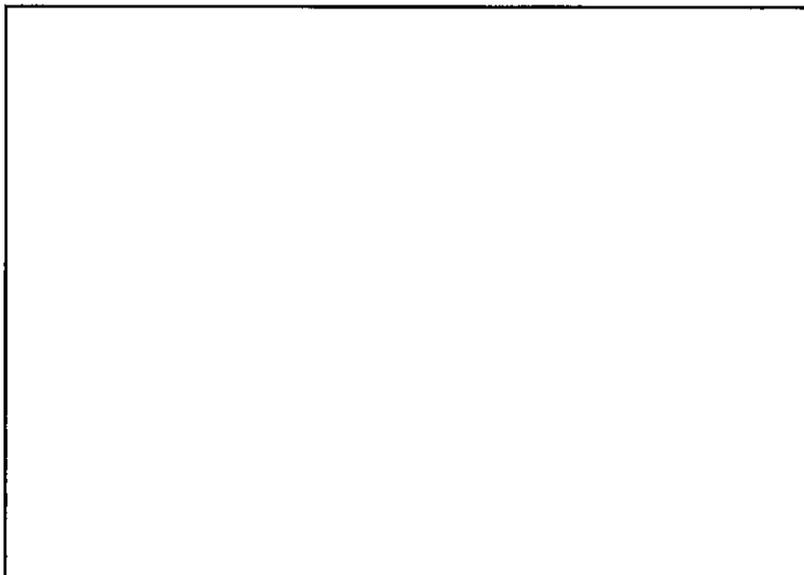
写真(口)B 参 2- 17



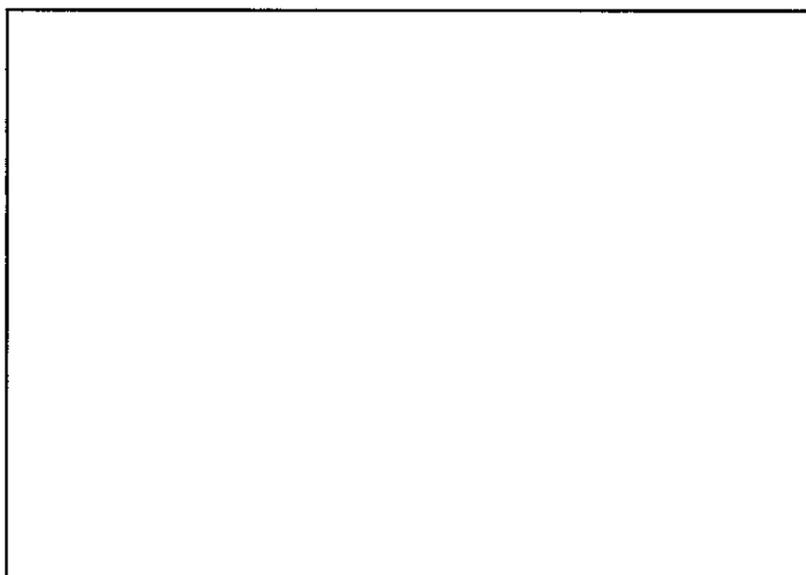
写真(口)B 参 2- 18



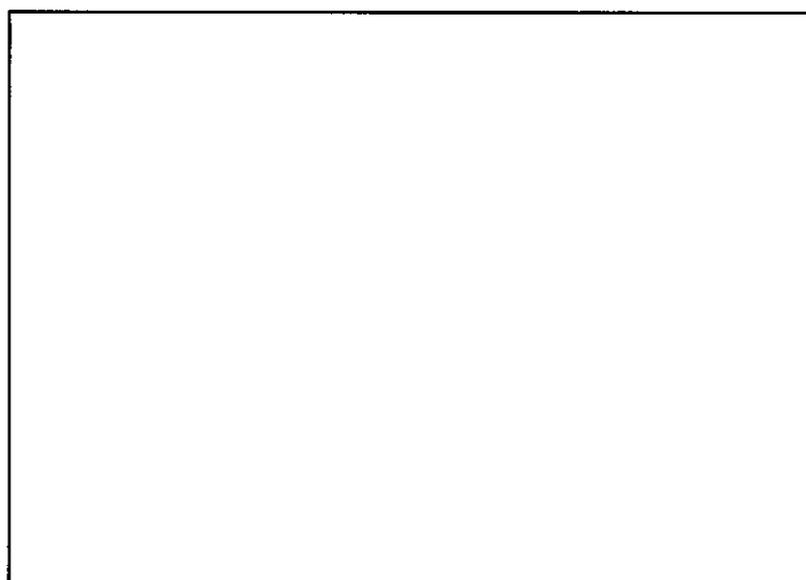
写真(口)B 参 2- 19



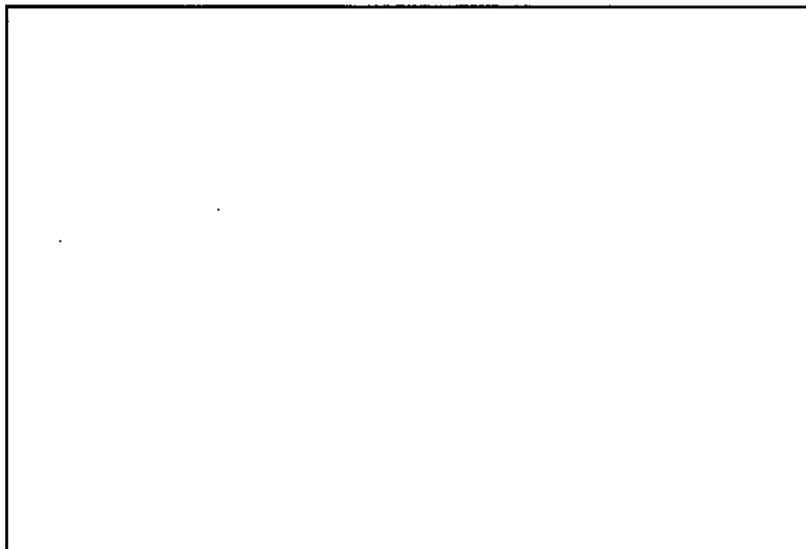
写真(口)B 参 2- 20



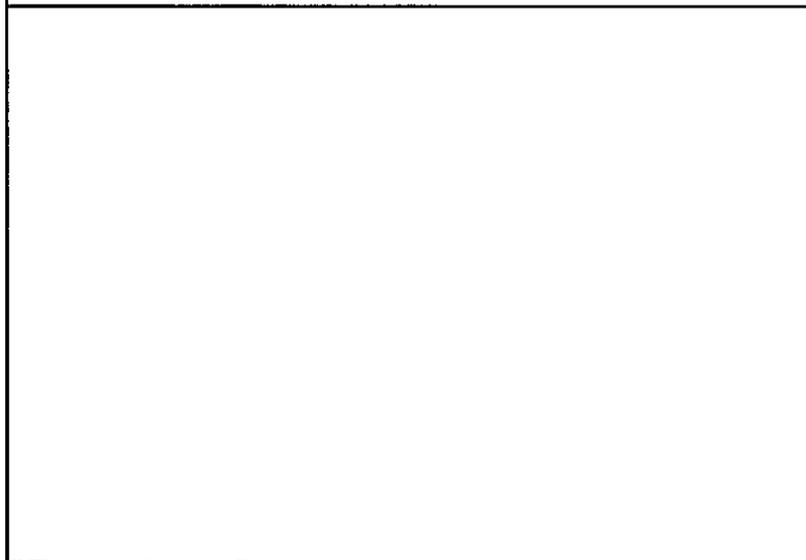
写真(口)B 参 2- 21



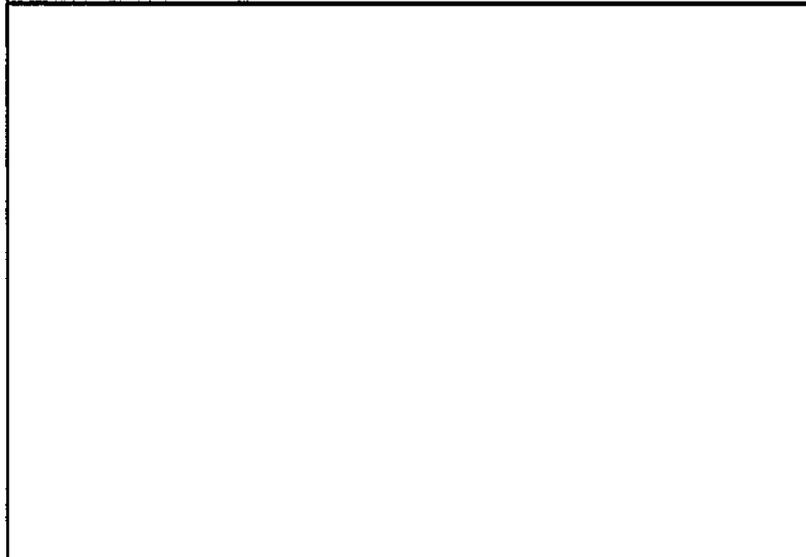
写真(口)B 参 2- 22



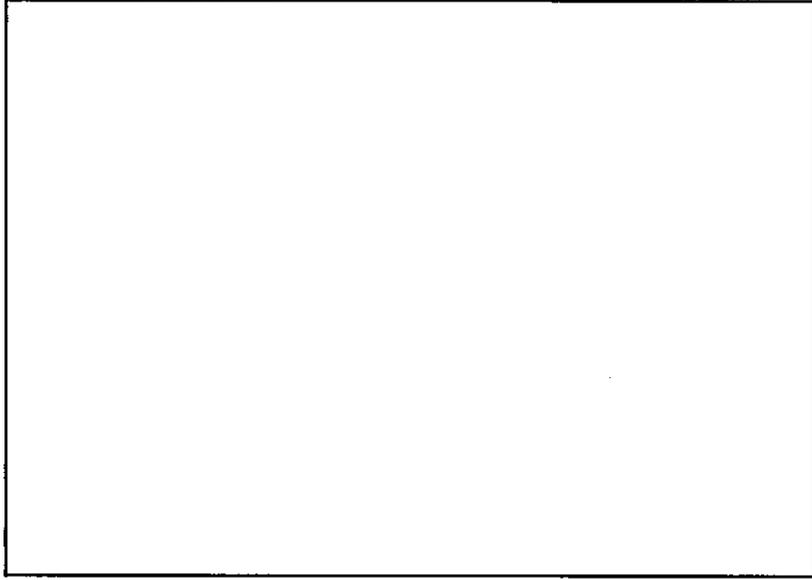
写真(口)B 参 2- 23



写真(口)B 参 2- 24



写真(口)B 参 2- 25



参(口)B.2-31

(ロ)-C 密封解析

C.1 概 要

本輸送物の密封境界は燃料棒である。従って、燃料棒の密封性について評価する。

(1)一般の試験条件

本輸送物は A 型輸送物であるため、規則第五条第九号イに基づき一般の試験条件下において、放射性物質の漏出が無いことを説明する。

(2) 特別の試験条件

本輸送物は B 型輸送物に該当しないため、特別の試験条件下における密封性は要求されないが、特別の試験条件下において密封境界である燃料棒内に放射性物質が封じ込められることを説明する。

C.2 密封装置

C.2.1 密封装置

密封境界である燃料棒は、その内部が常温において Pa に加圧されており、かつ、原子炉内の高温高压条件（被覆管温度約 400 °C、外圧約 1.6×10^7 Pa）下で長期間使用されても密封性を維持するように設計されている。また、「輸送中に予想される温度変化」による最大内圧は、燃料棒については、「(ロ)-B.4.4 最大内圧」で述べたように、輸送中の輸送物最高温度が °C となるときの、内外圧力差は Pa となる。この場合、燃料棒の被覆管部に発生する応力は、「(ロ)-A.5.1.3 応力計算」で述べたように、最大 MPa となるが、この応力は、表(ロ)A-3 に示すジルカロイ-4 及びジルコニウム合金の耐力 MPa に比べて十分に小さく、燃料棒の密封性は保持される。

C.2.2 密封装置の貫通部

本輸送物の密封境界である燃料棒は継ぎ目無し圧延管の両端を端栓を用いて密封溶接しているため、貫通部に該当するものはない。

C.2.3 密封装置のガスケット及び溶接部

燃料棒は、前述したように燃料棒両端を端栓で密封溶接しており、ガスケットに該当するものはない。また、溶接部については、すべての燃料棒についてリークテストを行い、その密封性を確認している。

C.2.4 蓋

密封境界である燃料棒には、蓋に該当するものはない。

C.3 一般の試験条件

1) 水噴霧

燃料棒は、リークテストによりその密封性が確認されているので、水の吹付け試験で水が内部へ浸入することはない。

2) 自由落下

自由落下試験による輸送物の変形は、輸送容器の変形に留まり収納物の変形はなく、燃料棒の密封性は維持される。(「(ロ)-A.5.3 自由落下」参照)

3) 積み重ね

積み重ね試験による輸送物の変形は、輸送容器の弾性変形域に留まり収納物の変形はなく、燃料棒の密封性は維持される。(「(ロ)-A.5.4 積み重ね試験」参照)

4) 貫通

貫通試験による輸送物の変形は、輸送容器の変形に留まり収納物の変形はなく、燃料棒の密封性は維持される。(「(ロ)-A.5.5 貫通」参照)

C.3.1 放射性物質の漏えい

燃料棒の密封性は、一般の試験条件下においても維持されるので、放射性物質の漏えいはない。

C.3.2 密封装置の加圧

燃料棒は、その内部がヘリウムガスで常温において最大 Pa に加圧されている。

また、封入された放射性物質は、未照射の二酸化ウラン焼結体又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体であるため、核分裂生成ガスは発生しない。したがって、その内圧の変化は、温度変化による。この温度変化による内圧上昇によっても燃料棒の密封性が損なわれないことを確認している。(「(ロ)-C.2.1 密封装置」参照)

C.3.3 冷却材汚染

冷却材を使用していないので、冷却材汚染はない。

C.3.4 冷却材損失

冷却材を使用していないので、冷却材損失はない。

C.4 特別の試験条件

本輸送物は A 型核分裂輸送物であり、特別の試験条件下における密封性は要求されないが、特別の試験条件下において、放射性物質は漏出することなく、燃料棒内に保持される。以下に特別の試験条件化における結果を要約する。

「A.9.2.5 特別の試験条件まとめ」で示したように、特別の試験条件における一連の試験（落下試験Ⅰ、落下試験Ⅱ、熱的試験）を原型容器で実施したところ、収納物である燃料集合体は健全性が維持されていた。また、一連の試験終了後、ヘリウムリーク試験を実施し、漏えいがないことを確認した。

「B.5.6 結果の要約及びその評価」で示したように、熱的試験で実測した最高温度に基づく解析評価で密封境界に破損がないことを確認した。

なお、浸漬試験は実施していないが、燃料棒は原子炉内の高温高圧条件（被覆管温度約 400℃、約 16MPa の外圧）に耐えられるように設計されており、深さ 0.9m の水頭下（外圧 0.01MPa）に 8 時間以上浸漬しても破損することはないと評価される

C.4.1 核分裂生成ガス

燃料棒内に封入される放射性物質は未照射の二酸化ウラン焼結体又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体であるため、核分裂生成ガスは発生しない。

C.4.2 放射性物質の漏えい

前述の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ており、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ける輸送物の密封性について評価した。この結果密封境界である燃料棒は破損せず、常に密封性が保たれることを確認した。

参考のため、特別の試験条件下における輸送物の密封性について評価した。この結果、密封境界である燃料棒は健全であり、漏えいがないことが確認できた。

このことから、臨界解析においては、燃料棒内には浸水しないものとして解析を行う。

(ロ)D 遮蔽解析

D.1 概要

本輸送容器に収納するのは、濃縮度 %以下の濃縮ウランを使用した PWR 用燃料集合体または燃料棒組立体であり、その線源強度が低いので特別の遮蔽装置は設けていない。

輸送物からの放射線量のほとんどは、ウラン及びその娘核種がアルファ崩壊またはベータ崩壊する際に放出するガンマ線によるものである。

遮蔽解析にあたって、線源は単位量当たりの線源強度が最も高い濃縮度 %の濃縮ウランの線源強度を使用した。通常輸送時及び一般の試験条件下の輸送物の線量当量率は、以下のような条件で点減衰核積分コード QAD-CGGP2R を用いて求めた。本コードは国際放射線防護委員会 (ICRP) の 1990 年勧告 (Publication. 74) の取り入れにより国内の法律法令で採用された実効線量当量の計算が可能となっている。

- ① 通常輸送時の解析モデルは、遮蔽体として、容器本体のステンレス鋼を考慮した。
- ② 一般の試験条件下の解析モデルは、容器本体が径方向に mm 及び軸方向に mm ずつ縮んだモデルとした。
- ③ 本輸送容器の収納物は濃縮度 5wt%以下の PWR 新燃料集合体及び燃料棒組立体であるが、燃料棒組立体の UO_2 量は燃料集合体に比べて大幅に少ないため、燃料集合体を収納した場合を代表ケースとして解析を行う。評価は 14×14 型、15×15 型、17×17 型タイプ 64 及び 17×17 型タイプ 57 の 4 ケースに付いて比較し最も安全側の結果となる 17×17 型タイプ 57 について通常輸送時及び一般の試験条件について最大値を与える評価点を求めた。
- ④ 線源領域となる各燃料集合体の最大ウラン量及び外寸法と燃料有効長を考慮してモデル化した。輸送容器には燃料集合体 2 体を収納するモデルとした。
- ⑤ 線源強度はウランの娘核種を考慮して ORIGEN 2 コードを用いて求めた。

以上のような解析条件のもとで得られた計算結果を表(ロ)D-1 に示す。この結果より、通常輸送時における輸送物表面の線量当量率は mSv/h 以下であり、また表面より 1 m の点における線量当量率は μSv/h 以下であるので、基準の線量当量率 (表面で 2 mSv/h 以下、表面より 1 m の点で 100 μSv/h 以下) を満足している。

一般の試験条件下における表面での線量当量率は mSv/h 以下であり、基準の線量当量率 (表面で 2 mSv/h 以下) を満足している。線量当量率の増加割合は %とわずかである。

D.2 線源仕様

本収納物の最大収納量は、二酸化ウランで

14×14 型 2 体収納時： kg-UO₂

15×15 型 2 体収納時： kg-UO₂

17×17 型タイプ 64 2 体収納時： kg-UO₂

17×17 型タイプ 57 2 体収納時： kg-UO₂

である。

収納物である二酸化ウラン焼結体は固体状でその理論密度は $1.096 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ である。

D.2.1 ガンマ線源

収納物は濃縮度が %以下の未照射濃縮ウランで、その主要構成核種は ²³²U、²³⁴U、²³⁵U、²³⁶U、²³⁸U 及び ⁹⁹Tc である。線源仕様の詳細を以下に示す。

(1) ウラン同位体及びウラン娘核種

本輸送物の収納物である濃縮ウランの種類は

濃縮ウラン（再生濃縮ウランを除く：ASTM C996-04 ECGU に準拠）

$$^{232}\text{U} \leq 0.0001 \text{ } \mu\text{g/gU}$$

$$^{234}\text{U} \leq 10 \times 10^3 \text{ } \mu\text{g/g}^{235}\text{U}$$

$$^{236}\text{U} \leq 250 \text{ } \mu\text{g/gU}$$

$$^{99}\text{Tc} \leq 0.01 \text{ } \mu\text{g/gU}$$

ただし、²³⁶U < 125 $\mu\text{g/gU}$ の場合は、²³²U 及び ⁹⁹Tc は適用外

であり、濃縮度を %としたときの各同位体の組成は ²³²U %、
%、%、%、%であり、残りはすべて
²³⁸U とした。

(2) 線源強度

(1)に記したウランの同位体について ORIGEN 2 コードを用いて、娘核種を考慮したガンマ線源スペクトルを求めた。表(ロ)D-2にガンマ線源スペクトルの計算結果を示す。

(ORIGEN 2 コードについては参考資料(ロ)-D.1を参照のこと)また同様に、各同位体の放射エネルギーを計算した。計算結果を表(ロ)D-3に示す。

D.2.2 中性子源

該当せず。

表(ロ)D-1 輸送物最大線量当量率

	輸送物の表面		表面から 1 m の点	
	側面中央部	端部	側面中央部	端部
通常輸送時	<input type="text"/> Sv/h	<input type="text"/> Sv/h	<input type="text"/> Sv/h	<input type="text"/> Sv/h 以下
基準	≤ 2 mSv/h		≤ 100 μSv/h	
一般の試験条件下	<input type="text"/> Sv/h	<input type="text"/> Sv/h	————	————
基準	≤ 2 mSv/h		————	

表(ロ)D-2 ガンマ線源スペクトル計算結果 (kg-UO₂相当)

平均γ線エネルギー (MeV)	線源スペクトル (Photons/s)

表(ロ)D-3 各同位体の放射エネルギー (kg-UO₂相当)

ウラン同位体	²³² U	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	⁹⁹ Tc	合計
放射エネルギー(Bq)	<input type="text"/>						

D.3 モデル仕様

D.3.1 解析モデル

D.3.1.1 通常輸送時

解析モデルを図(ロ)D-1に示す。

本輸送容器は円筒形状の内筒と外筒から構成されており、それぞれ内筒は、内径φ \square mm、長さ \square mm、外筒は内径φ \square mm、長さ \square mmの円筒にモデル化した。遮蔽体としては容器本体のステンレス鋼を考慮し、外部のスタッキングブラケットや脚、内部の燃料集合体支持構造物は考慮しない。

内筒の板厚は胴部で \square mm、端部で \square mmであり外筒の板厚は、胴部で \square mm、端部で \square mmとして解析した。

線源領域は燃料集合体2体のそれぞれの外寸法と燃料有効長を考慮した多線源モデルとしており、この領域内に二酸化ウランとジルコニウムが均質に分布しているものとした。

計算点は、輸送物の表面及び表面より \square mの点とした。

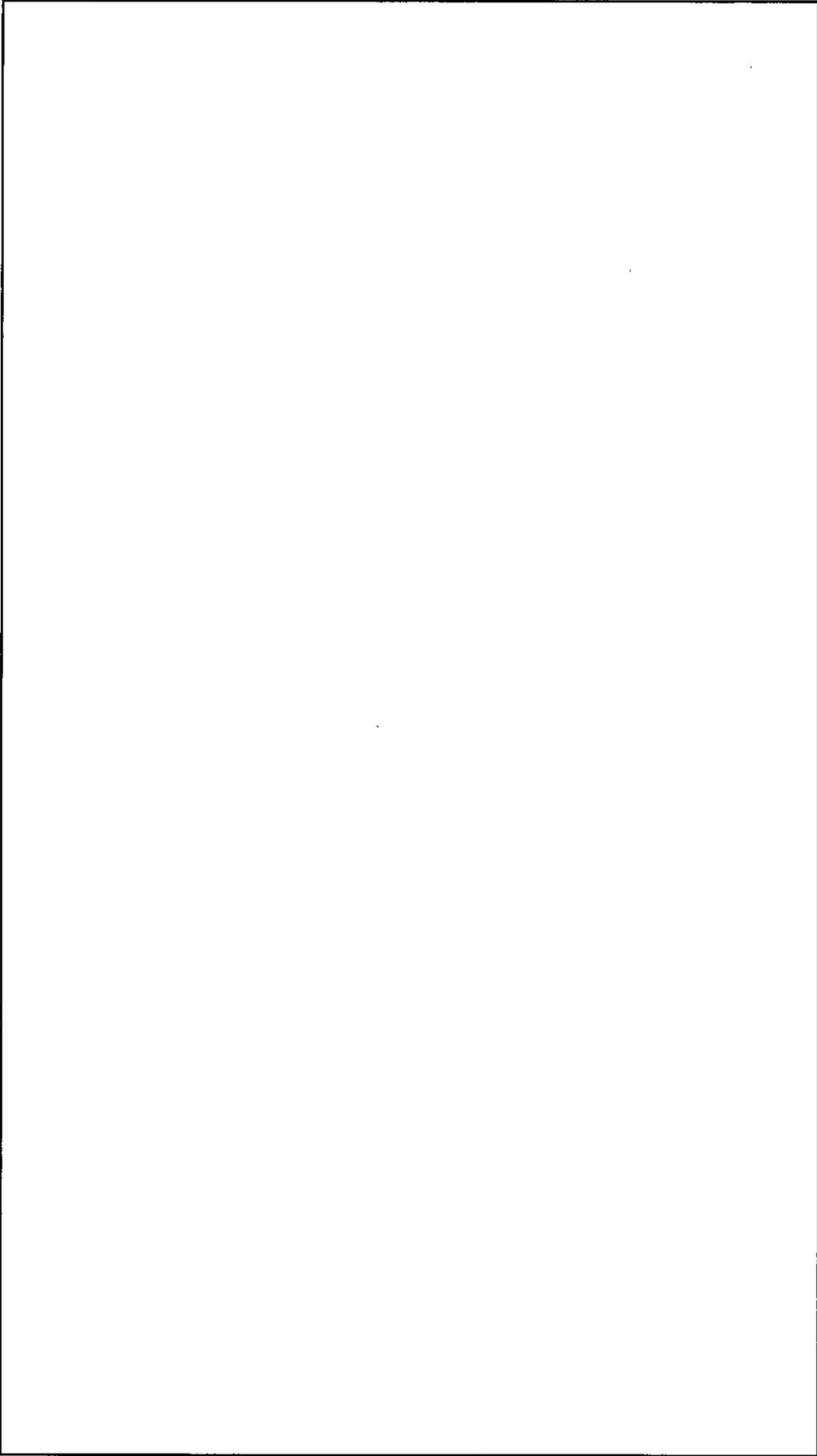
D.3.1.2 一般の試験条件

解析モデルを図(ロ)D-2に示す。

一般の試験条件において、「(ロ)-A.5.7 結果の要約及びその評価」に記述したように外筒は水平落下により \square mm変形し、内筒にも変形が及んだ。垂直落下では外筒は \square mm変形したが内筒は変形しなかった。

遮蔽解析においては、水平落下では外筒、内筒ともに \square mmずつ径方向に一様に変形したものとし、軸方向には外筒のみ片側 \square mmずつ縮むものとした。すなわち内筒が内径φ \square mm、長さ \square mm及び外筒が内径φ \square mm、長さ \square mmの円筒にモデル化した。遮蔽体としては内外筒のステンレス鋼を考慮した。

一般の試験条件においては収納物の変形は起こらないので、線源領域は通常輸送時と同じとした。



図(ロ)D-1 通常輸送時解析モデル



図(ロ)D-2 一般の試験条件解析モデル

D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

遮蔽計算モデルにおける領域は、線源及び容器本体に分けられる。各領域の密度、組成及び原子個数密度を表(ロ)D-4に示す。

線源及び容器本体以外の領域はすべて空気として計算した。

表(ロ)D-4 各領域の密度、組成及び原子個数密度

領域		密度(g/cm ³)	元素	原子個数密度 (atoms/barn·cm)
線源	14×14型		U	
			O	
			Zr	
	15×15型		U	
			O	
			Zr	
	17×17型タイプ64		U	
			O	
			Zr	
	17×17型タイプ57		U	
			O	
			Zr	
容器本体 SUS304			Fe	
			Cr	
			Ni	

D.4 遮蔽評価

図(ロ)D-1 及び図(ロ)D-2 に示した遮蔽計算モデルについて QAD-CGGP2R コードを用いて遮蔽解析を行った。(QAD-CGGP2R コードについては参考資料(ロ)-D.2 を参照)

ガンマ線のエネルギー群分けについては、ORIGEN 2 コードのエネルギー群構造と同じとした。本透過計算でのビルドアップ係数は、遮蔽体の材質に合わせて鉄のビルドアップ係数を使用した。

評価では、NFI-V 型輸送物に各燃料集合体 (14×14 型、15×15 型、17×17 型タイプ 64、17×17 型タイプ 57) をそれぞれ収納した通常輸送時の側面中央部及び側面中央部から 1m の点について最大値を示すポイントを評価した (表(ロ)D-5 参照)。その結果ウラン収納量が最大となる 17×17 型タイプ 57 収納時に最大線量当量率が得られることが判ったため、17×17 型タイプ 57 収納時の通常輸送時及び一般の試験条件下における評価を実施した。

このようにして求めた線量当量率の結果を表(ロ)D-1 に示した。一般の試験条件下における線量当量率の増加割合は 3%とわずかである。

表(ロ)D-5 各燃料集合体収納時の最大線量当量率

	側面中央部		側面中央部から 1 m の点	
14×14 型		Sv/h		Sv/h
15×15 型		Sv/h		Sv/h
17×17 型タイプ 64		Sv/h		Sv/h
17×17 型タイプ 57		Sv/h		Sv/h

D.5 結果の要約及びその評価

NFI-V 型輸送物の通常輸送時及び一般の試験条件下における遮蔽解析を実施した。

この結果、表(ロ)D-1 に示すように、各条件における線量当量率は規則に規定されている値を超えることはなく、本輸送容器は十分な遮蔽性能を有している。

参考資料

参考資料 (ロ)・D.1 ORIGEN 2 コードの概要

参考資料 (ロ)・D.2 QAD-CGGP2R コードの概要

参考資料 (ロ)・D.3 最大線量当量率を与える評価点の検討

ORIGEN 2 コードの概要

ORIGEN コードは米国オークリッジ国立研究所で 1973 年に開発されたコードで、原子炉の運転履歴に従って核分裂生成物(FP)、アクチナイド、構造材の組成、放射能強度、発熱量等を計算するためのコードである。

一般に核種の生成崩壊過程は次式によって記述される。

$$dX_i / dt = \sum_{j=1}^N l_{ij} \lambda_j X_j + \phi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i) X_i \quad \text{—————} \quad \text{①}$$

(i = 1, ……., N)

- X_i : 核種 i の個数(原子密度)
- N : 核種の数
- l_{ij} : 核種 j が崩壊して核種 i を生成する割合
- λ_j : 核種 j の崩壊定数
- X_j : 崩壊して核種 j を生成する核種 j の個数
- ϕ : 位置及びエネルギーについて平均化した中性子束
- f_{ik} : 核種 k が中性子を吸収して核種 i を生成する割合
- σ_k : スペクトルについて平均化した核種 k の中性子吸収断面積
- X_k : 核種 k の個数
- λ_i : 核種 i の崩壊定数
- σ_i : 核種 i の中性子吸収断面積

①式において、短い時間区分内では核種の原子数密度 X の変化にかかわらず ϕ が一定であると仮定すると、この方程式は連立一次常微分方程式をとり、次式のように書ける。

$$\dot{\underline{X}} = \underline{A} \underline{X} \quad \text{—————} \quad \text{②}$$

②式において、 \underline{X} は X_i を成分に持つベクトルであり \underline{A} は定数マトリックスである。

②式は

$$\underline{X}(t) = \exp(\underline{A} t) \underline{X}(0) \quad \text{—————} \quad \text{③}$$

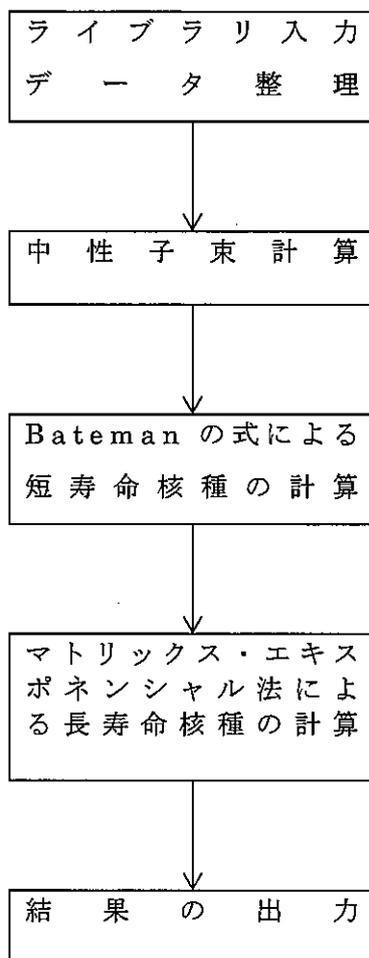
と解くことができる。ただし $\exp(\underline{A} t)$ は

$$\exp(\underline{A} t) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\underline{A} t)^m}{m!} \quad \text{—————} \quad \text{④}$$

と定義する。このような解法はマトリックス・エクスポネンシャル法と呼ばれ、④式の右辺を数値的に求めれば、初期条件 $\underline{X}(0)$ が与えられているから③式により時刻 t における原子数密度 X が求められる。なお、短寿命の核種については①式の解析解である Bateman の式を併用して解を求める。

本解析で使⽤した ORIGIN コードのバージョンは ORIGIN2-82 を使⽤した。

ORIGIN コードの概略フローチャートを以下に示す。



ORIGIN コードのフローチャート

QAD-CGGP2Rコードの概要

2.1 概要

QAD-CGGP2R コードは、米国ロスアラモス国立研究所 LANL (Los Alamos National Laboratory) で開発された三次元点減衰核積分法計算コード QAD-CG を、日本原子力研究所が改良したコード QAD-CGGP2 コードをもとに、実効線量を計算できるようさらに改良したコードである。この実効線量は、平成 12 年 10 月 23 日に公布された ICRP1990 年勧告の取り入れ等による放射線障害防止法関係法令の改正により、平成 13 年 4 月 1 日以降遮蔽計算で評価すべき線量となった。

QAD の解法は、一般に点減衰核法と呼ばれるもので体積線源を幾つかの微小体積に分割し、これから計算点までのガンマ線の減衰を物質による指数減衰及び距離の逆二乗減衰により計算する。直接線以外の散乱線の寄与は、ビルドアップ係数により近似される。線源全体から計算点における寄与(線束、線量率等)は、各微小体積の合計により求めるものである。

2.2 特長

点減衰核法では、散乱線はビルドアップ係数を用いて考慮されるが、エネルギースペクトル変化及びガンマ線の角度分布は考慮できない。QAD-CGGP2R コードは三次元形状の入力が比較的容易であること、ビルドアップ係数計算方法が幾何学的級数方程式(G-P 法)を用いていること、及び ICRP Publication 74 に準拠した線量率が計算できることが主な特長である。

QAD-CGGP2R コードでは線源及び遮蔽体形状として三次元の取扱いが可能で、線源形状は円筒形、直方体及び球の 3 種類、遮蔽体は直方体、球、円柱、楕円柱、円すい台、楕円体、くさび形、箱及び任意の六面体の、9 種類の立体の組み合わせで表現することが可能である。

入力データは、線源のエネルギー・形状・強度・分割数、体系形状・領域の指定、物質の密度、ビルドアップ係数の選択及び計算点の位置よりなる。出力情報は、入力データ及び各計算点での線束と空気カーマ率もしくは実効線量・1 cm 線量当量である。

計算に必要な質量吸収係数、照射線量ビルドアップ係数及び ICRP Publication 74 及び ICRP Publication 51 に対応した線量率算出時に必要な実効換算係数はコードに内蔵されている。

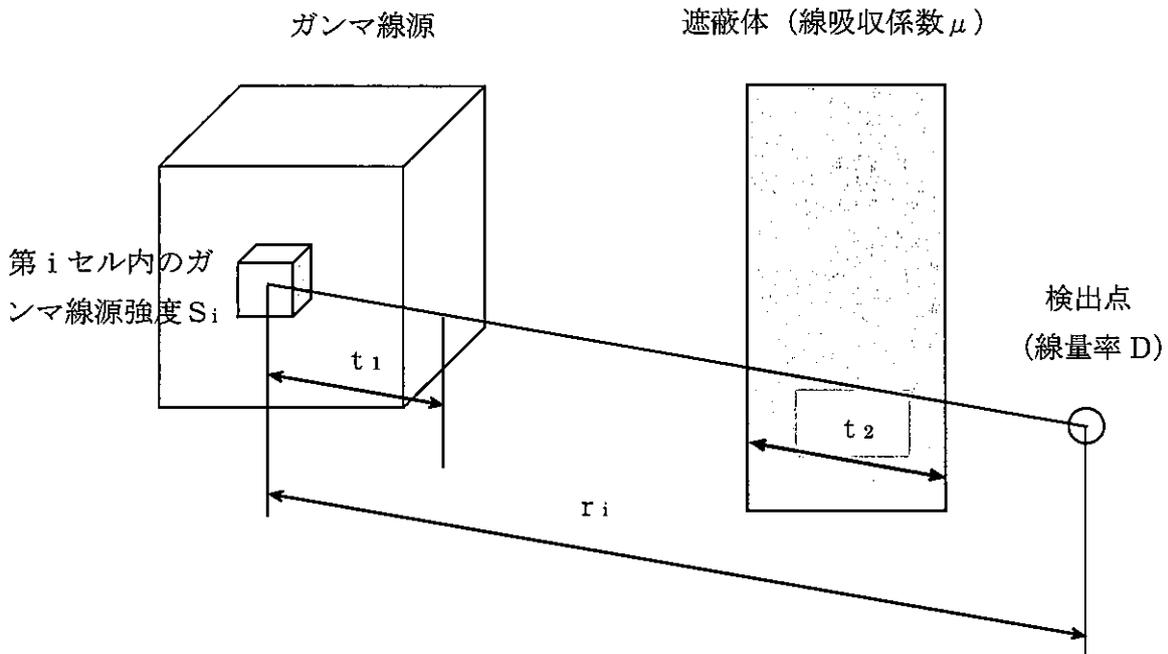
2.3 計算方法

点減衰核法は有限な広がりをもつ体積線源を体積要素（以下、線源要素と呼ぶ）に分割し、その各々を点状線源とみなして空間積分により計算点での寄与を求めるものである。以下に、計算点における線量当量率（D）の算出式を示す。

$$D = \sum_j K_j \sum_i \frac{B(\sum_k \mu_{jk} \cdot t_k, E_j) \cdot f_x(\sum_k \mu_{jk} \cdot t_k, E_j) \cdot S_{0ij} \cdot \exp(-\sum_k \mu_{jk} \cdot t_k)}{4\pi r_i^2}$$

ここで

- i : 線源の各線源要素に対する添字
- j : 線源のエネルギーに対する添字
- k : 空間を分割した後の各領域に対する添字
- K_j : エネルギー-j に対する吸収線量率変換係数 (Gy/hr) / (photons/cm²/sec)
- B : 照射線量ビルドアップ係数
- f_x : 実効換算係数
- S_{0ij} : 線源要素 i におけるエネルギー-j に対する線源強度 (photons/sec)
- μ_{jk} : エネルギー-j における領域 k に対する線吸収係数 (cm⁻¹)
- E_j : j 番目のガンマ線入射エネルギー (MeV)
- t_k : 空間内の領域 k に対するガンマ線の通過距離 (cm)
- r_i : 線源要素 i から計算点までの距離 (cm)



最大線量当量率を与える評価点の検討

1. 概要

遮蔽解析において、各燃料集合体の有効部をそれぞれ線源とする多線源の遮蔽解析モデルとして評価を実施している。この場合、単線源のモデルと異なり各評価点に各線源の影響が現れるため、最大線量当量率を与える評価点を簡単には決定できない。

このため、NFI-V型輸送物の遮蔽解析では、輸送物の側面中央部及び端部において最大線量当量率を与える評価点を求めた。評価は図 1 に示すように輸送物側面中央部については、周方向に輸送物を頂部を□°として片側□°まで行い、また、端部に付いては、輸送物中心位置から外筒表面に水平方向で最大線量当量率を与える評価点を求めた。

評価は各燃料集合体を収納した状態ごとに、輸送物側面中央部と側面中央部から 1 m の点について比較し、最大値が得られた燃料集合体を収納した場合について通常輸送時及び一般の試験条件下における遮蔽解析を実施した。

2. 検討結果

(1) 輸送物側面中央部における最大値 (通常輸送時)

各燃料集合体 (14×14 型、15×15 型、17×17 型タイプ 64 及び 17×17 型タイプ 57) を収納した場合の側面中央部周方向で最大線量当量率を与える評価点を求めた結果を図 2 に示す。各燃料集合体とも、頂部から約□°の方向で最大線量当量率を示すことが判る。また、最大値は 17×17 型タイプ 57 収納時に得られた。

(2) 輸送物側面中央部から 1 m の点における最大値 (通常輸送時)

各燃料集合体 (14×14 型、15×15 型、17×17 型タイプ 64 及び 17×17 型タイプ 57) を収納した場合の側面中央部から 1 m の点にて周方向で最大線量当量率を与える評価点を求めた結果を図 3 に示す。各燃料集合体とも、頂部から約□°の方向で最大線量当量率を示すことが判る。また、最大値は 17×17 型タイプ 57 収納時に得られた。

(3) 輸送物端部表面及び端部表面から 1 m の点 (通常輸送時)

(1)及び(2)から最大線量当量率は 17×17 型タイプ 57 収納時に得られることが判ったため、本燃料集合体を収納した場合の端部表面及び端部表面から 1 m の点について最大線量当量率を与える評価点を求めた結果を図 4 及び図 5 に示す。

(4) 一般の試験条件下における輸送物側面中央部及び端部表面

最大線量当量率は 17×17 型タイプ 57 で収納時に得られることから、本燃料集合体を収納した場合の側面中央部及び端部表面について最大線量当量率を与える評価点を求めた結果を 図 6 及び 図 7 に示す。

3. まとめ

新燃料集合体を収納する NFI - V 型輸送物の通常輸送時及び一般の試験条件下における輸送物表面と表面から 1 m における点の最大線量当量率を評価した。

その結果、17×17 型タイプ 57 を収納した場合に最大線量当量率を示すこと及び、最大線量当量率は、輸送物側部及び端部の表面、表面から 1 m の点においてともに輸送物中心から若干ずれた位置で得られることが判った。

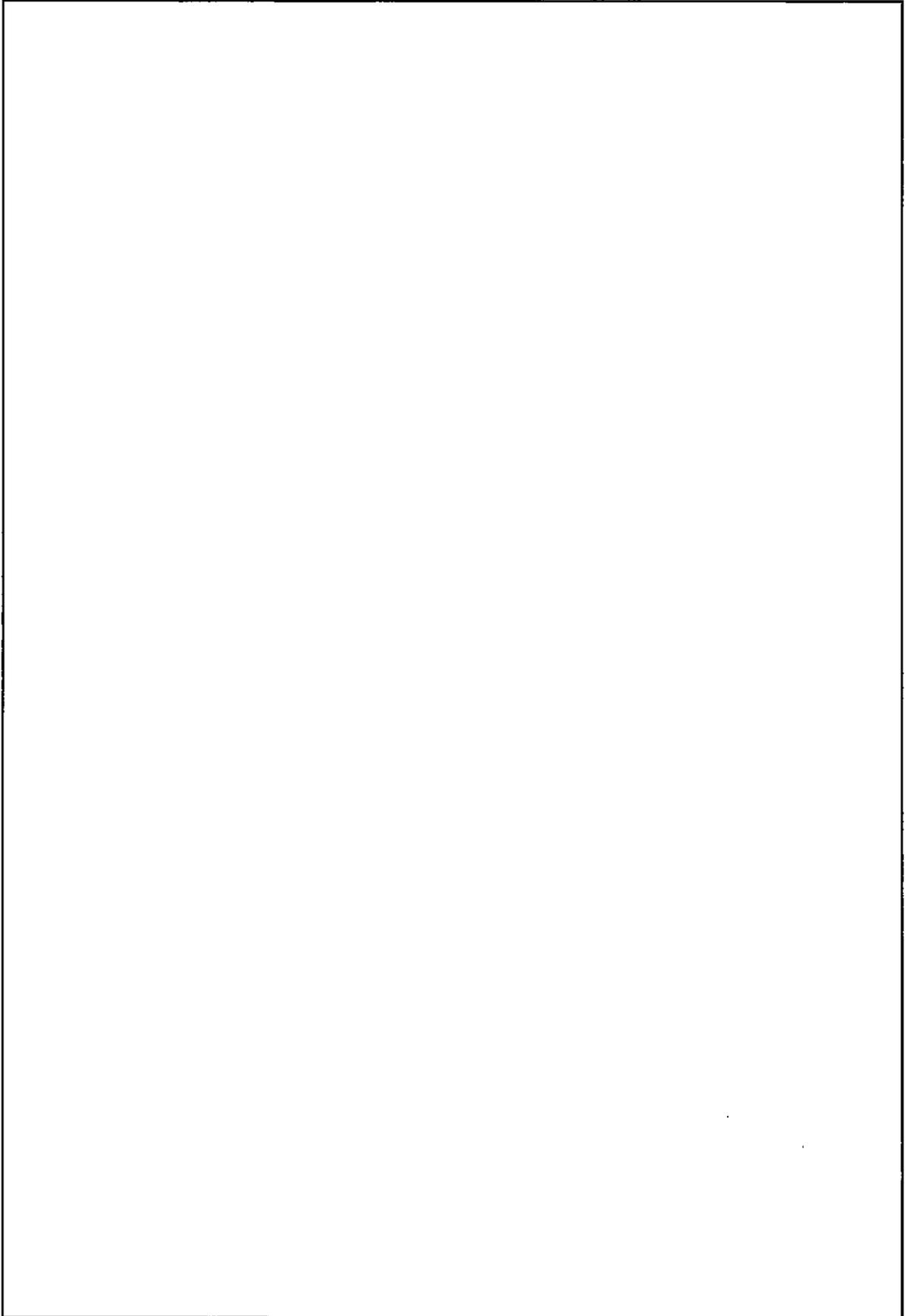


图 1 線量当量率評価点説明概略図

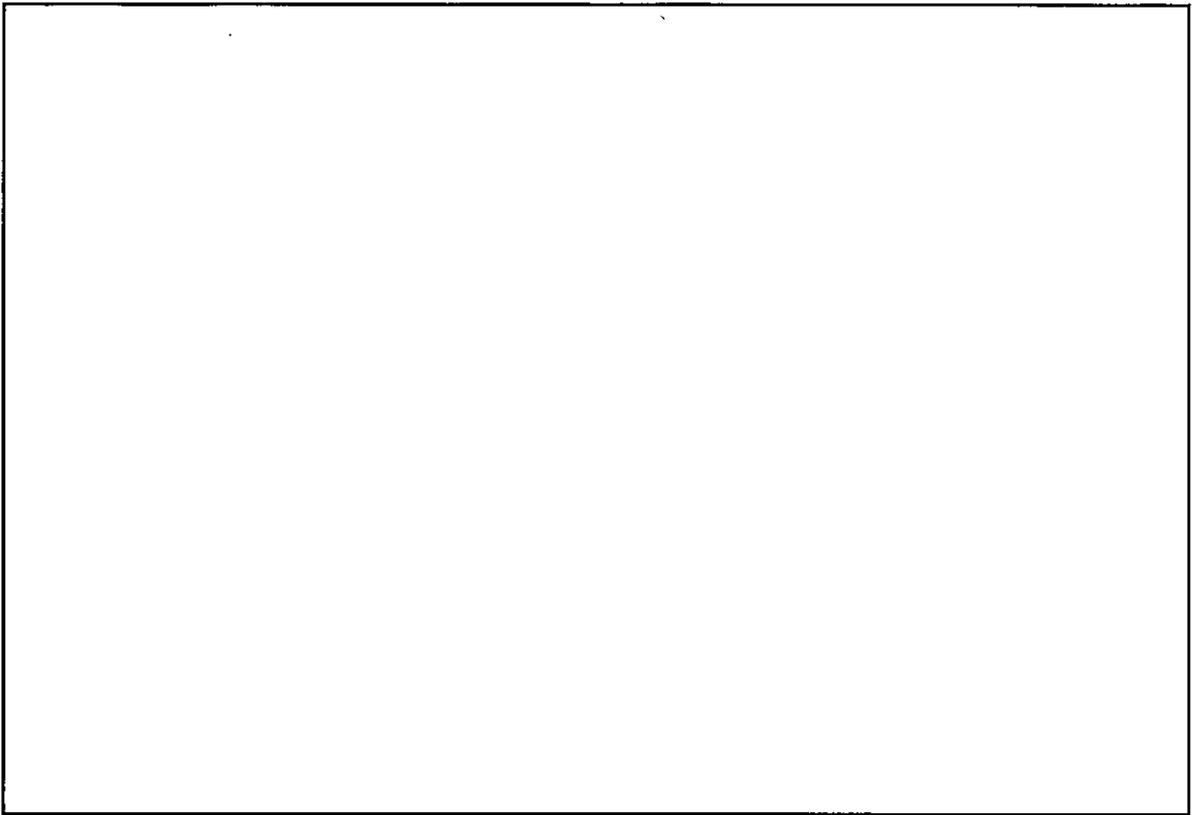


図 2 輸送物側面中央部評価結果 (通常輸送時)

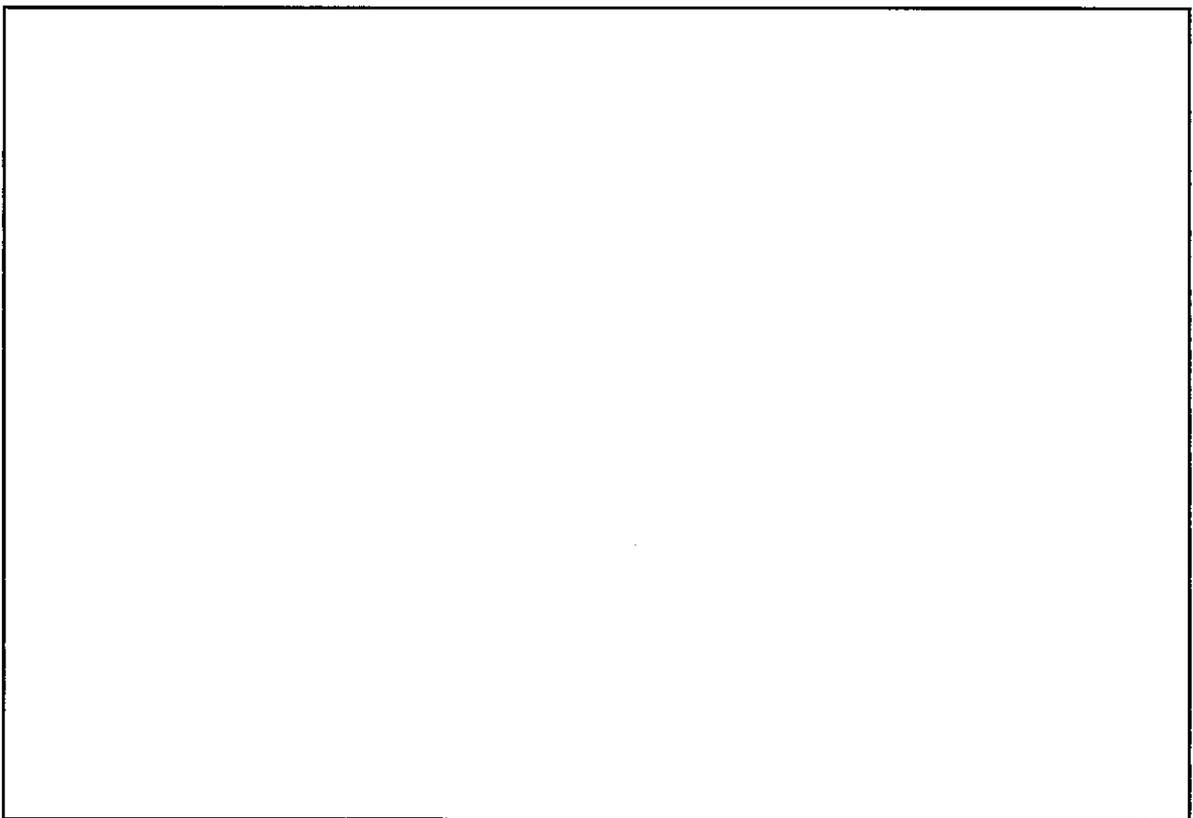


図 3 輸送物側面中央部から 1 m の点評価結果 (通常輸送時)

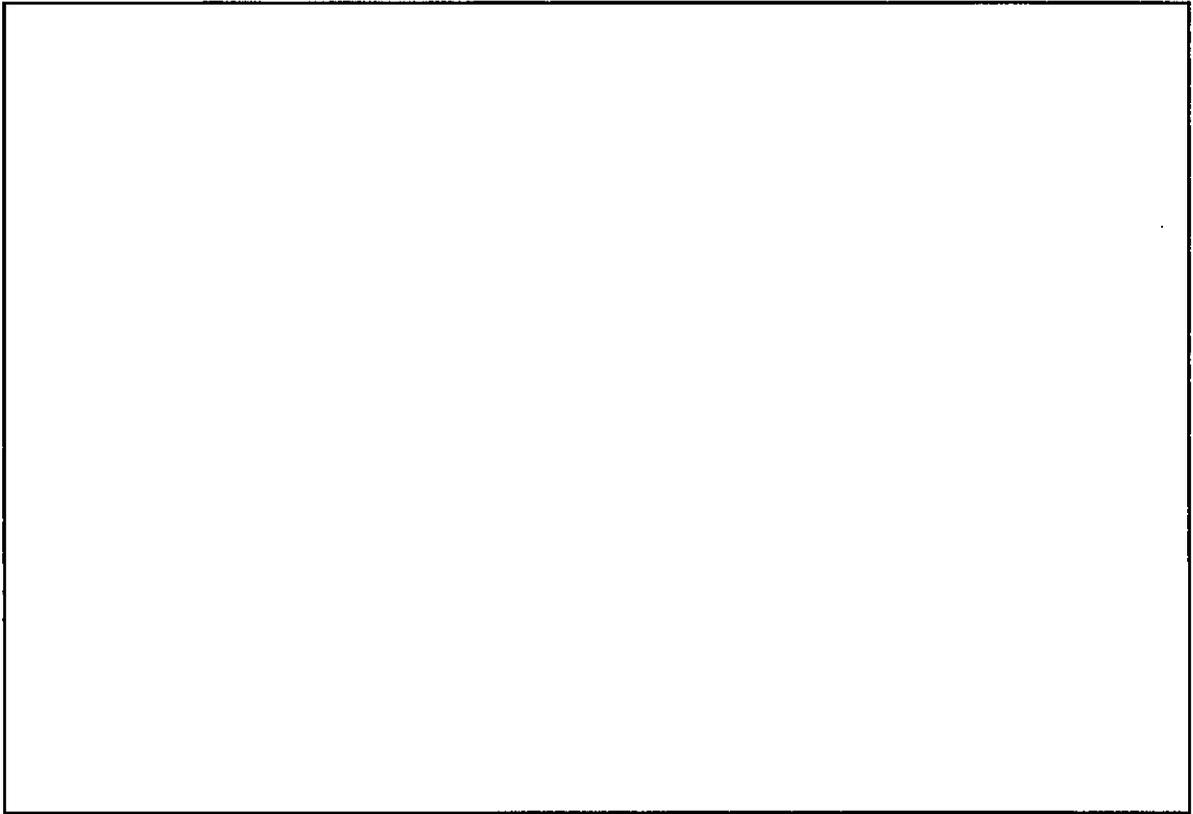


図 4 輸送物端部表面評価結果 (通常輸送時)

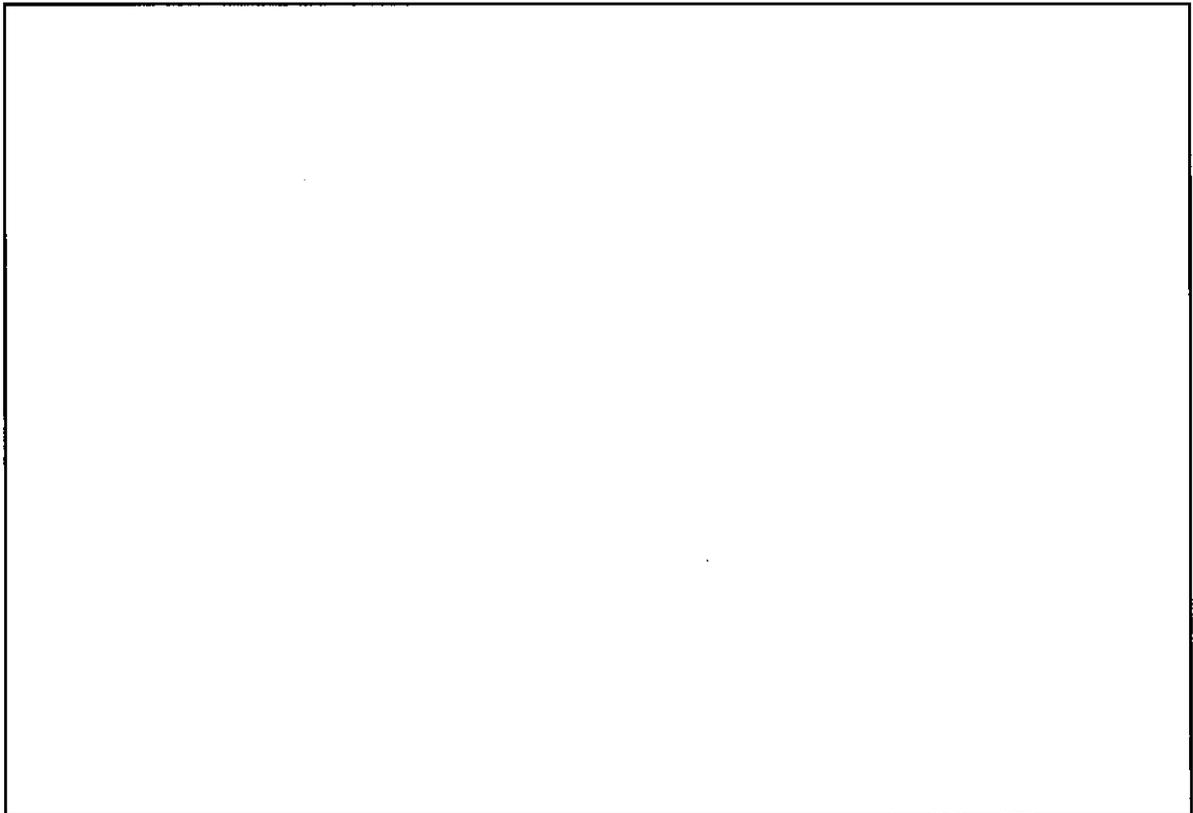


図 5 輸送物端部表面から 1 m の点評価結果 (通常輸送時)

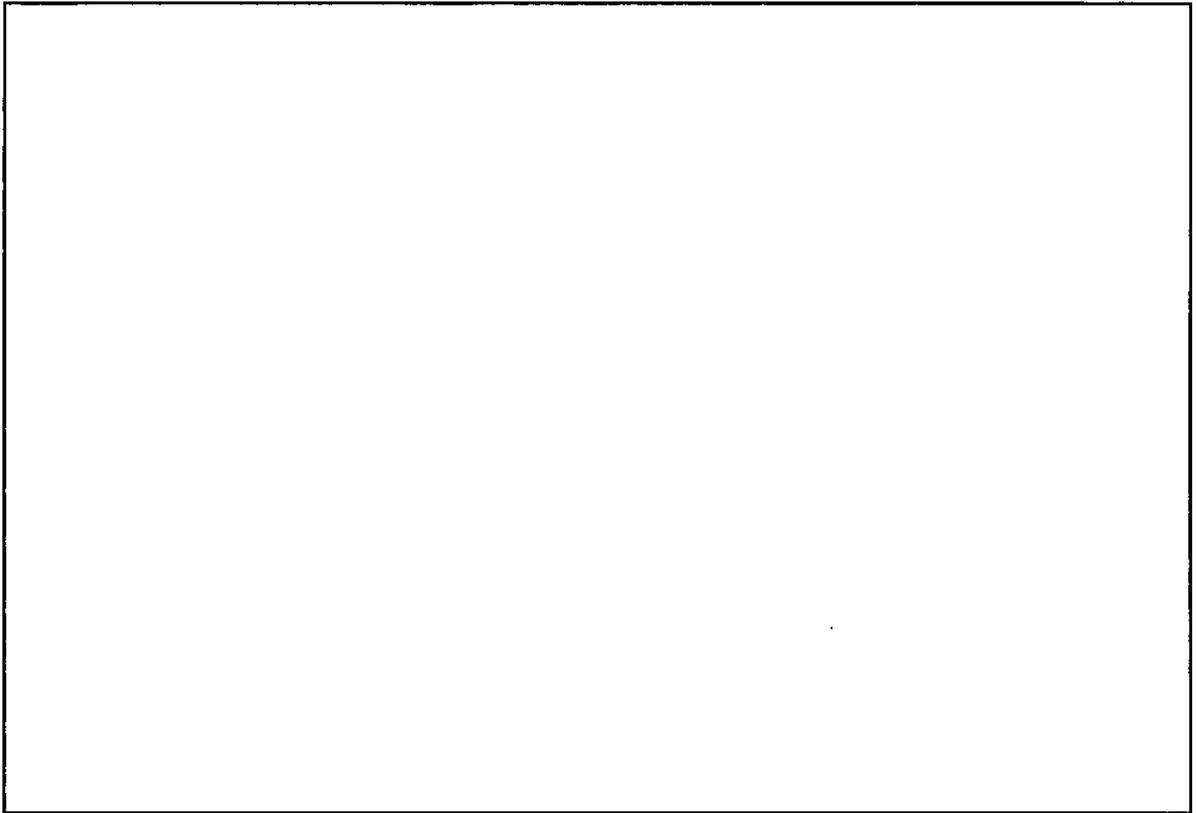


図 6 輸送物側面中央部評価結果（一般の試験条件）

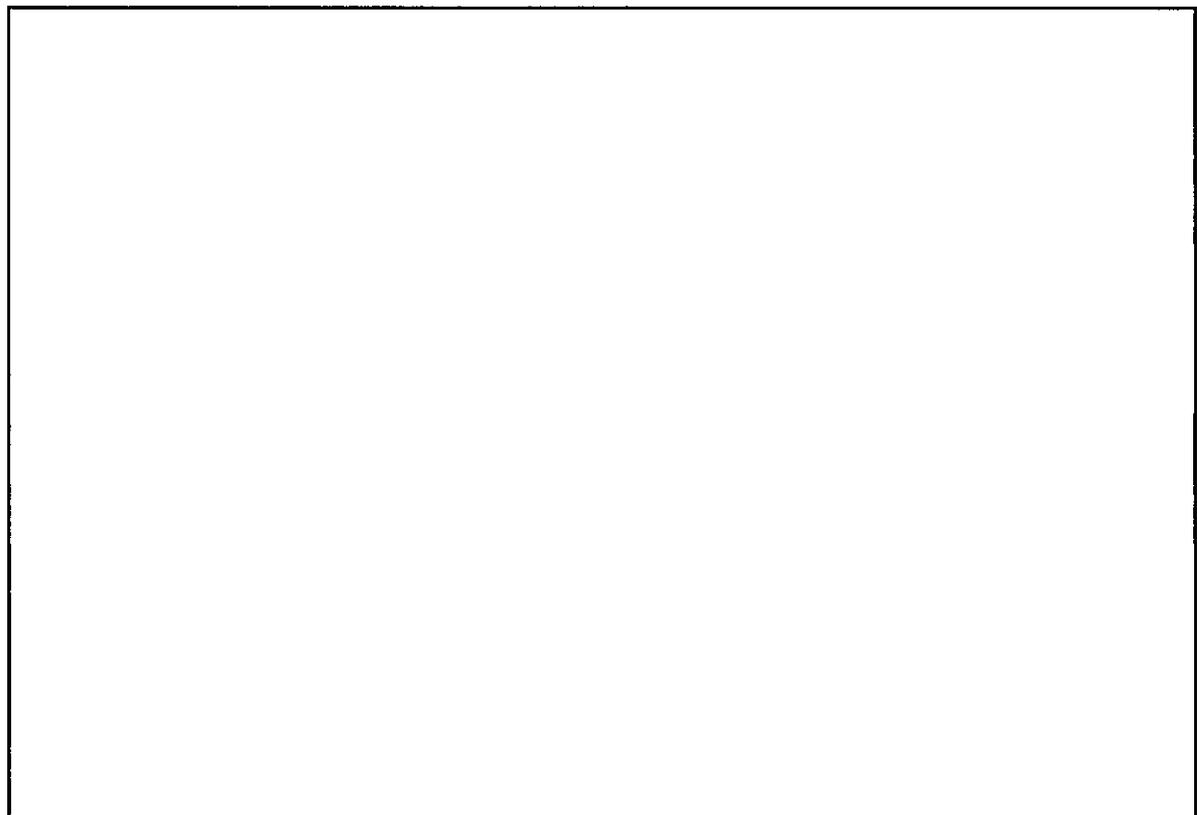


図 7 輸送物端部表面評価結果（一般の試験条件）

(ロ)-E 臨界解析

E.1 概要

本輸送物は、輸送制限個数を として、通常輸送時はもちろんのこと一般及び特別の試験条件においても臨界に達することがないように設計されている。

臨界解析では、以下のいずれの条件においても臨界に達しないことを評価する。

- ① 輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ② 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ③ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ④ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合
- ⑤ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

なお、本解析においては上記のうち評価上最も厳しい条件である、特別の試験条件下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合について、臨界計算コード KENO V.a コードを用いた解析を行い、未臨界であることを確認する。

E.2 解析対象

E.2.1 収納物

本輸送容器の収納物は濃縮度 $\square\%$ 以下の PWR 新燃料集合体及び燃料棒組立体である。燃料棒組立体の UO_2 量は燃料集合体に比べて大幅に少ないため、収納物が燃料集合体の場合を代表ケースとして解析を行う。

燃料集合体仕様を表(ロ)E-1に示す。濃縮ウランには反応度を低下させる ^{234}U が含まれているが、解析においては安全側にすべて ^{238}U として計算した。特別の試験条件下における収納物の変化については、以下のとおりである。

・

・ 収納物である燃料棒の密封性は損なわれず、放射性物質の損失または散逸はない。

表(ロ)E-1 燃料集合体仕様

項 目	14×14 型	15×15 型	17×17 型 (タイプ 64)	17×17 型 (タイプ 57)
燃 料 組 成	濃縮度 5%以下の UO_2	同 左	同 左	同 左
焼 結 体 直 径	9.21 mm	9.21 mm	8.05 mm	8.19 mm
焼 結 体 密 度	97%TD 以下	同 左	95%TD 以下	97%TD 以下
燃 料 棒 有 効 長	3,642 mm	同 左	3,648 mm	同 左
被 覆 管 組 成	ジルカローイ-4 及び ジルコニウム合金	同 左	ジルカローイ-4	ジルカローイ-4 及び ジルコニウム合金
被 覆 管 肉 厚	0.66 mm	0.66 mm	0.64 mm	0.57 mm
被 覆 管 外 径	10.72 mm	10.72 mm	9.50 mm	同 左
燃 料 棒 本 数	179 本	204 本	264 本	同 左
燃 料 棒 配 列	14×14 正方格子	15×15 正方格子	17×17 正方格子	同 左
UO ₂ 量				
燃料棒ピッチ				

E.2.2 輸送容器

輸送容器は図(イ)-1 に示すような円筒形状で主要材質は SUS304、内部に 2 体の収納物を収納することができる。

「(ロ)-A.9.2 特別の試験条件」に記述したように、特別な試験条件下において、輸送容器には水平落下により外筒上側ケースに径方向に□mm の変形を生じる。

E.2.3 中性子吸収材

本輸送物には各収納物の二面に接して□%ボロン入りステンレス鋼板が置かれており、これらと容器ケースによる中性子吸収の効果を考慮した。

「(ロ)-A.9.2 特別の試験条件」に記述したように、特別の試験条件下において、ボロン入りステンレス鋼板は局所的に変形するが、その機能が損なわれることはない。

E.3 モデル仕様

E.3.1 解析モデル

(1) 孤立系

配列系の評価において完全水没状態についても評価を実施することから、孤立系の評価は配列系の評価に包含される。そのため、孤立系の評価は実施せず、配列系の評価を代表とする。

(2) 配列系

一般の試験条件下と特別の輸送条件下を比較すると、特別の試験条件下の方が容器の変形が大きく、収納物どうしの間隔が短くなり、一般の試験条件下よりも中性子増倍率が大きくなる。そのため、解析モデルとして特別の試験条件下における損傷状態を考慮したモデルを解析対象とした。本輸送物の輸送制限個数は□である。

特別の試験条件下に置いた輸送物のモデル化は以下の通りである（図(ロ)E-1 参照）。

・輸送容器

- 輸送容器には水平落下により外筒上側ケースに□mmの変形を生じるが、モデル化ではさらに内筒及び内部構造物まで変形し、外筒表面から燃料集合体までの隙間がないものとする。具体的には、燃料集合体と輸送容器外側までの距離は、外筒の板厚□mm、内筒の板厚□mm、弓型クランプの角パイプ□mm及びUサポートの板厚□mmのみを考慮して（図(ロ)E-2 参照）、□mmとする。なお、輸送容器外寸の減少は他の輸送容器内の燃料集合体との間隔が接近し、核的相互作用を高め保守的評価を与えることから、本モデル化は妥当である。
- 容器内外の構造物の内、燃料集合体を保持するUサポート及び弓型クランプ等による中性子吸収の効果は考慮せず、燃料集合体の2面に接して置かれるボロン入りステンレス鋼板及び容器ケースの中性子吸収効果のみを考慮した。

・収納物（燃料集合体）

- 輸送容器には2体の燃料集合体を収納する。燃料集合体の仕様は表(ロ)E-1に示すように濃縮度上限□%と中性子増倍率が最も高くなる値に設定した。
- 集合体部材である上下部ノズル、支持格子及び端栓等はモデル化せず、二酸化ウラン焼結体及び被覆管のみをモデル化した。
- 落下試験Iの結果から、燃料集合体の燃料棒のピッチが小さくなる圧縮変形が生じ

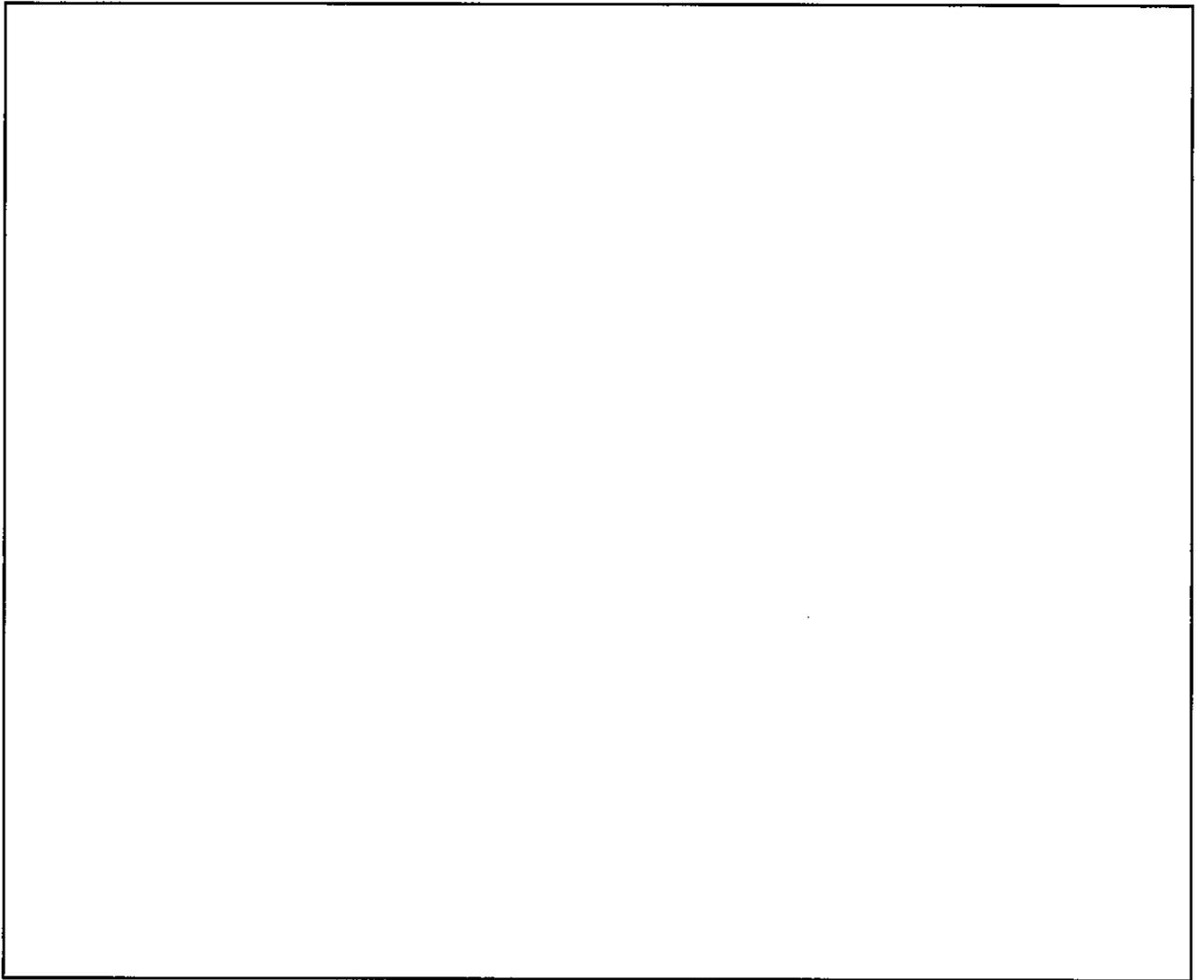
るが、燃料棒のピッチの減少は体系の実効増倍係数を低下させる方向であるため、モデル化では燃料集合体に変形はないものとして解析を行った。

・浸水

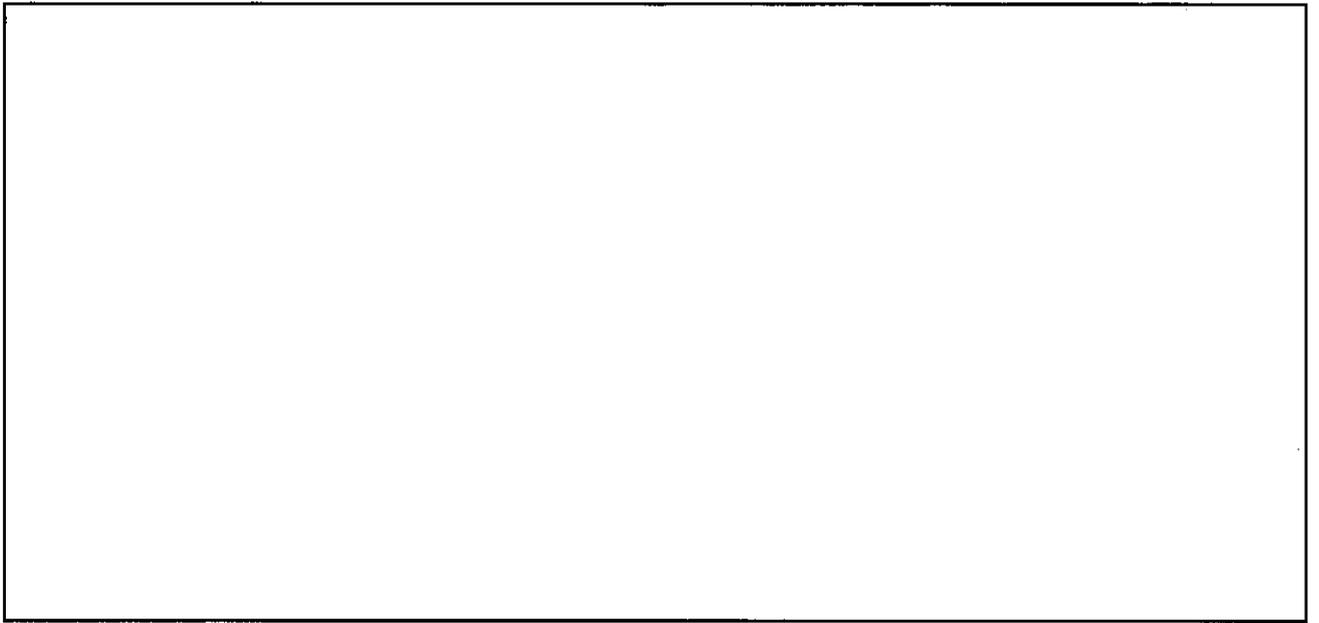
- 容器は完全に水没するものとする。また、特別の試験条件においても燃料棒被覆管は破損しないことから、燃料棒被覆管内は浸水しないものとする。
- 水密度を変化させ、最適減速条件となるよう考慮する。

・配列

- 長さ方向に二酸化ウラン焼結体及び被覆管が無限長続くものとし、2次元体系として評価する。
- 径方向の外境界を完全反射条件とすることにより、無限個の輸送物の臨界性を評価する。



図(ロ)E-1 配列系臨界解析モデル



図(ロ)E-2 輸送容器の変形モデル

E.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

本解析に使用した輸送物の各領域の原子個数密度を表(ロ)E-2に示す。

表(ロ)E-2 計算に使用した各領域の原子個数密度 (atoms/barn·cm)

領域 元素	燃 料 棒 セ ル			水	ステンレス 鋼 板	ボロン入り ステンレス 鋼 板
	焼 結 体	被 覆 管	減 速 材			
²³⁵ U						
²³⁸ U						
Zr						
H						
O						
SUS304						
B						

(注) 中性子減速材及び水の個数密度は水密度が g/cm³ の場合である。焼結体中に中性子吸収物質であるガドリニアが含まれる場合には、実効増倍率が低くなるため、より厳しい条件として、計算ではガドリニアを考慮しない。

E.4 未臨界評価

E.4.1 計算条件

安全側の設定として、実際の収納物、輸送容器の構造や試験結果よりも厳しいモデルとした点を以下にまとめる。

- ・ 特別の試験条件下における輸送容器の変形量を実体より大きく設定し、燃料集合体間の核的相互作用が高まるモデルとした。
- ・ 燃料集合体を保持する U サポート及び弓型クランプや燃料集合体部材である上下部ノズル、支持格子及び端栓等をモデル化せず、それらの中性子吸収効果を考慮しない。
- ・ 落下試験においては燃料集合体の燃料棒ピッチが小さくなる圧縮変形が生じるが、燃料棒のピッチの減少は体系の実効増倍係数を低下させる方向であるため、燃料集合体の変形は考慮しない。

以上のようなモデル化は、輸送物の増倍率を安全側に評価できるものである。

E.4.2 輸送物への水の浸入等

解析においては、容器内に水が浸入するものとする。また、燃料棒被覆管内については浸水しないものとする。後述するように、代表的な収納物について水密度を変化させて解析を行い、その影響について考慮している。

E.4.3 計算方法

本計算に使用したコードは KENO-V.a である⁽¹⁾。

KENO-V.a は SCALE システム(A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation)とよばれるコードシステムの一部である。このコードシステムは、原子炉施設や原子燃料輸送容器等の許認可評価のための解析手法を標準化するために、米国原子力規制委員会(NRC)が立案し、その支援の下、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)により開発されたシステムである。このうち KENO-V.a は臨界安全解析を行うために準備された多群モンテカルロコードであり、複雑な体系の中性子増倍率の計算を行う臨界計算コードである。

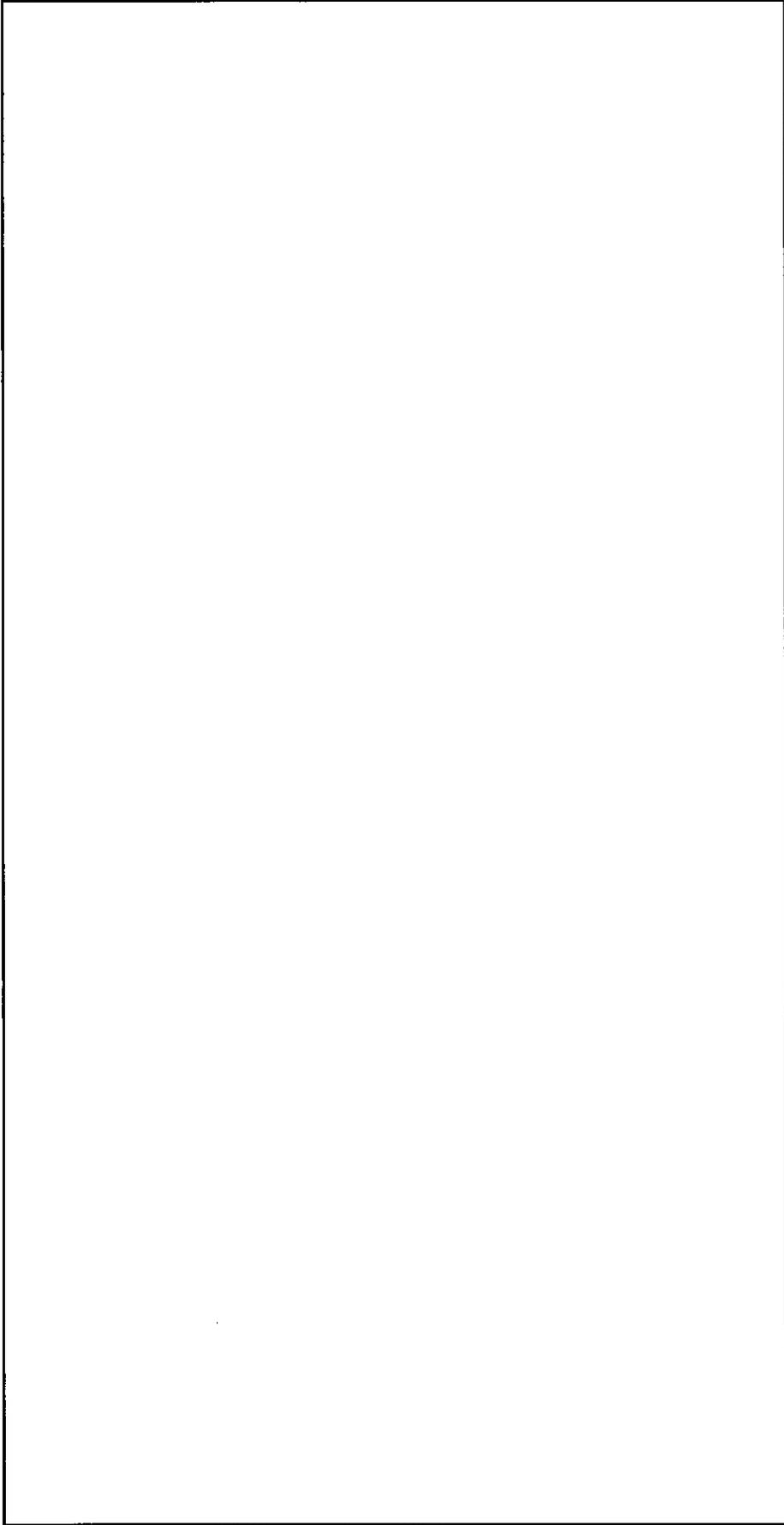
E.4.4 計算結果

特別の試験条件下における配列系において最も中性子増倍率が大きくなる計算結果を表 (ロ)E-3 に示す。なお、水密度については図(ロ)E-3 に示すように、 \square g/cm³ で実効増倍係数最大になる。

なお、17×17 型タイプ 64 に対する評価はウラン量の多い 17×17 型タイプ 57 の結果に包絡され、17×17 型タイプ 57 の結果が安全側の評価となることから省略する。

表(ロ)E-3 実効増倍係数の計算結果

項目	14×14 型	15×15 型	17×17 型 タイプ 57
平均値			
評価値 (3σ 含む)			



図(ロ)E-3 水密度変化に伴う実効増倍係数

E.5 ベンチマーク試験

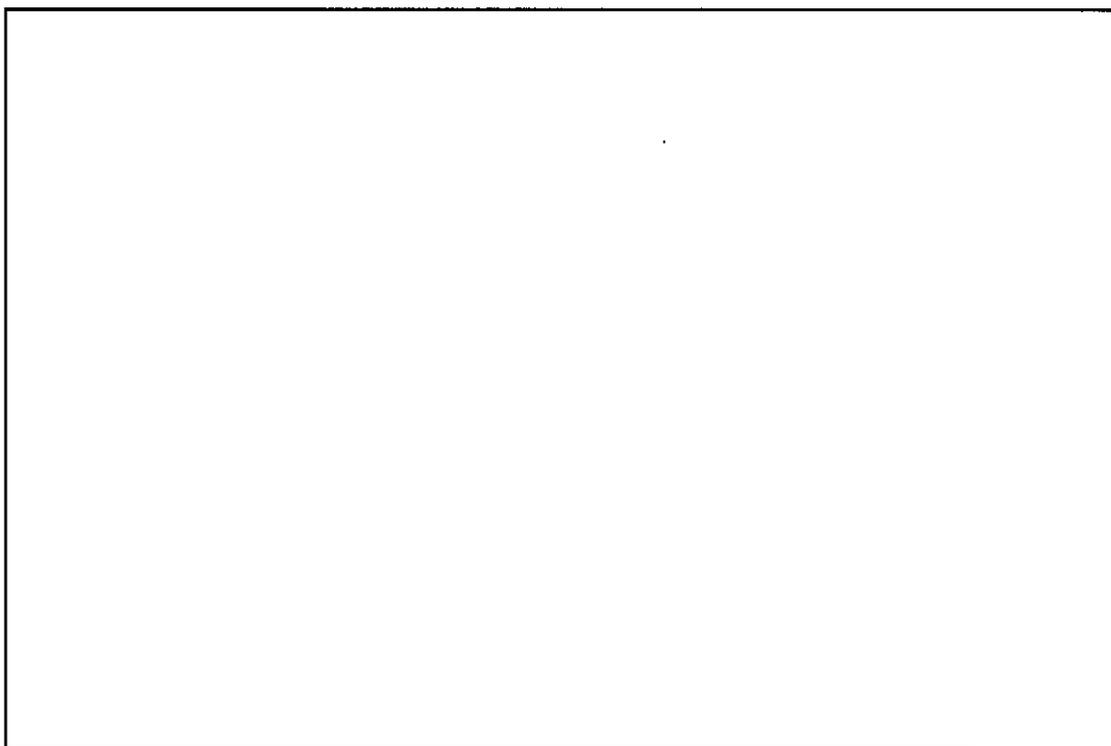
OECD/NEA の国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト (ICSBEP) では、評価済み臨界ベンチマーク実験ハンドブック (ICSBEP ハンドブック) を発行している。

ICSBEP ハンドブックでは、各種パラメータによって臨界実験が分類されて掲載されている。そこで、本輸送物の臨界評価に関連する分類 (LEU-COM-THERM: 低濃縮-化合物-熱中性子スペクトル) から ケースのベンチマーク試験を抽出し、本輸送物の臨界評価で使用した計算方法と同じ計算方法を用いて実験解析を行なった。計算結果をに示す。また、図(ロ)E-4 に示した 425 ケースの計算結果に対する統計処理結果を 表(ロ)E-4 に示す。

表(ロ)E-4 より、本輸送物の臨界評価で使用した計算方法は、中性子増倍率を十分な精度で評価できることが分かる。

表(ロ)E-4 ベンチマーク実験解析結果のまとめ

ケース数	
平均誤差 (Δk (M-C) の平均値)	
標準偏差 (σ)	
信頼係数 (f: 99%信頼度・99%確率)	
推定臨界下限増倍率 ($1 - \Delta k - f\sigma$)	
制限値	



図(ロ)E-4 ベンチマーク実験解析結果

E.6 結果の要約及びその評価

NFI-V型輸送物の臨界解析を実施した。

解析においてはモデル化等で様々な安全側の仮定を行ったが、表(ロ)E-3に示すとおり、統計上の偏差値を考慮した実効増倍係数の最大値は15×15型で得られ、その値は□である。

この値は基準値の0.95未満であり、臨界安全上問題はないことを確認した。

参考文献

- (1) "Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages", NUREG/CR-6361 (ORNL/TM-13211), J. J. Lichtenwalter, S. M. Bowman, M. D. DeHart, and C. M. Hopper (1997)

(ロ)F 核燃料輸送物の経年変化の考慮

F.1 考慮すべき経年変化要因

本章では、本輸送物について使用を予定する期間中に想定される使用状況及びそれに伴う経年変化について考慮する。

本輸送容器及び繰り返し使用する収納物の使用予定期間は 80 年であり、使用期間を通しての輸送予定回数は計 400 回、また 1 回の輸送期間は通常最長 2 ヶ月を想定している。なお輸送容器に取付けられるショックマウントの使用期間は 10 年であり、10 年に 1 度の頻度で替えるものとする。また、輸送容器の吊り上げ予定回数は輸送 1 回あたり 10 回、輸送とは別に年間 20 回であり、使用期間を通しての吊り上げ予定回数は計 5,600 回 ($=400 \times 10 + 80 \times 20$) である。

本輸送物の使用期間中に想定される経年変化の要因としては、容器保管中や使用中における温度変化(熱)、収納物から発生する放射線、腐食等の化学変化及び繰り返し応力が生じることによる疲労が考えられる。そこで、これらの経年変化を生じさせる要因について、本輸送容器の構成部品と繰り返し使用する収納物に関して評価を実施する。

熱、放射線、化学変化の評価においては、使用予定より保守的な条件としてショックマウントを除く輸送容器及び繰り返し使用する収納物について、80 年の連続使用を考慮する。ショックマウントの評価においては、使用予定より保守的な条件として 15 年の連続使用を考慮する。

疲労の評価においては、ショックマウントを除く輸送容器及び繰り返し使用する収納物について、使用期間を通じた輸送回数を予定の 2 倍 ($400 \times 2 = 800$ 回)、輸送以外の年間吊り上げ回数を予定の 2 倍 ($20 \times 2 = 40$ 回) と想定し、計 11,200 回 ($=800 \times 10 + 80 \times 40$) の応力発生を考慮する。また、内圧による応力は、使用予定より保守的な条件として 80 年間毎日 1 日 1 回の輸送を実施すると想定し、 $80 \times 365 = 29,200$ 回発生すると考慮する。ショックマウントにおいては、17 年間使用されたショックマウントの剛性を荷重変位測定試験にて確認し、経年変化による安全評価への影響について評価する。

F.2 安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価

経年変化の考慮の必要性を確認する本輸送容器の構成部品として、安全機能を担う構成部品とその使用材料を下記に示す。

輸送容器の構成部品	材料
輸送容器構造材	ステンレス鋼
ロッドボルト	クロムモリブデン鋼
断熱材	セラミックファイバー
ショックマウント	ステンレス鋼 ブチルゴム
中性子吸収材	ボロン入りステンレス鋼

シリコンゴムは輸送容器のガスケットとして雨水や埃等の侵入を防止することを目的に使用しているものであり、密封境界を担保しているものではないため、安全機能を担う構成部品に該当しない。そのため、経年変化は考慮しない。

次に、経年変化を考慮する収納物として、燃料棒組立体の使用材料を下記に示す。

燃料棒組立体の構成部品	材料
上・下部ノズル	ステンレス鋼
支持構造	
その他構造材	
支持構造	ポリエチレン

以上を纏めると、輸送容器において経年変化の考慮の必要性を確認する材料は下記の5つである。

- ・ステンレス鋼
- ・クロムモリブデン鋼
- ・セラミックファイバー
- ・ボロン入りステンレス鋼
- ・ブチルゴム
- ・ポリエチレン

以下に、各材料の経年変化の考慮の必要性について、熱、放射線、化学及び疲労の観点から示す。

(1)ステンレス鋼

ステンレス鋼の経年変化の考慮について、表(ロ)F-1に示す。

表(ロ)F-1 ステンレス鋼の経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	技術基準への適合性評価時の考慮の必要性
ステンレス鋼	熱	使用期間中に想定されるステンレス鋼の温度範囲である -40°C から $\square^{\circ}\text{C}$ ((ロ)B.4.6 参照) までを考慮する。クリープの影響を受ける温度はステンレス鋼の融点 ($1,300^{\circ}\text{C}$ 以上) の三分の一である 433°C であり、運搬中に予想される最高温度($\square^{\circ}\text{C}$)と比較して十分に高いことから、仮にステンレス鋼を使用期間中、継続して上記温度環境下に置いた場合でも、組織変化、クリープ、割れ等の機械特性に影響を与えるような経年変化の影響は受けない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において、PWR 燃料集合体2体(濃縮度 $\square\%$ 、ウラン量は2体で \square kg-U)を収納するものとして条件を定める。80年の使用期間における中性子の累積照射量は \square n/cm ² 以下であり、ステンレス鋼の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{16} n/cm ² と比較して十分に小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	化学	ステンレス鋼は材料の表面に不動態膜を形成することから腐食は発生しにくい。また、定期自主検査の外観検査で腐食が確認された場合には補修する。さらに、発送前検査で外観に異常がないことを確認している。このため、使用期間内に腐食等の経年変化の影響は受けない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	疲労	ステンレス鋼は温度変化による内外圧力差及び吊り上げにより繰り返し応力が発生するため経年変化についての考慮が必要となる。温度変化による内外圧力差及び吊り上げにより輸送容器に発生する応力の繰り返し回数を、F.1で示したとおり保守側に設定した輸送回数に基づいて疲労評価を行う((ロ)A.4.4.7、(ロ)A.5.1.5 参照)。	有り

(2)クロムモリブデン鋼

クロムモリブデン鋼の経年変化の考慮について、表(ロ)F-2に示す。

表(ロ)F-2 クロムモリブデン鋼の経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	技術基準への適合性評価時の考慮の必要性
クロムモリブデン鋼	熱	使用期間中に想定されるクロムモリブデン鋼の温度範囲である -40°C から $\square^{\circ}\text{C}$ ((ロ)B.4.6 参照) までを考慮する。クリープの影響を受ける温度はクロムモリブデン鋼の融点 (900°C 以上) の三分の一である 300°C であり、運搬中に予想される最高温度 ($\square^{\circ}\text{C}$) と比較して十分に高いことから、仮にクロムモリブデン鋼を使用期間中、継続して上記温度環境下に置いた場合でも、使用期間に想定される温度範囲においては組織変化、クリープ、割れ等の機械特性に影響を与えるような経年変化の影響は受けない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において、PWR 燃料集合体 2 体 (濃縮度 $\square\%$ 、ウラン量は 2 体で $1,090\text{kg-U}$) を収納するものとして条件を定める。使用期間における中性子の累積照射量は \square \square n/cm^2 以下であり、クロムモリブデン鋼の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{18}n/cm^2 と比較して十分に小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない ²⁾ 。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	化学	クロムモリブデン鋼は防錆処置としてメッキが施されていることから腐食は発生しにくい。また、定期自主検査の外観検査で腐食が確認された場合には補修又は交換する。さらに、発送前検査で外観に異常がないことを確認している。このため、使用期間内に腐食等の経年変化の影響は受けない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	疲労	クロムモリブデン鋼において、温度変化による内外圧力差及び吊り上げにより繰り返し応力が発生するため経年変化についての考慮が必要となる。温度変化による内外圧差及び吊り上げにより輸送容器に発生する応力の繰り返し回数を、F.1 で示したとおり保守側に設定した輸送回数に基づいて疲労評価を行う ((ロ)A.4.4.7、(ロ)A.5.1.5 参照)。	有り

(3)セラミックファイバー

セラミックファイバーはアルミナ(Al_2O_3)とシリカ(SiO_2)を主成分とした無機繊維である。セラミックファイバーの経年変化の考慮について、表(ロ)F-3に示す。

表(ロ)F-3 セラミックファイバーの経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	技術基準への適合性評価時の考慮の必要性
セラミックファイバー	熱	使用期間中に想定されるセラミックファイバーの温度範囲である -40°C から $\square^\circ\text{C}$ ((ロ) B.4.6 参照) までを考慮する。セラミックファイバーの加熱収縮の原因となる結晶析出が発生する温度は $950^\circ\text{C}\sim 1000^\circ\text{C}$ であり ³⁾ 、運搬中に予想される最高温度($\square^\circ\text{C}$)と比較し十分に高いことから、セラミックファイバーを上記温度下に置いた場合でも組織変化等の経年変化の影響は受けない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において、PWR 燃料集合体2体(濃縮度 $\square\%$ 、ウラン量は2体で $\square\text{kg-U}$)を収納するものとして条件を定める。セラミックファイバーの主成分であるアルミナ(Al_2O_3)とシリカ(SiO_2)について経年変化の影響を確認する。使用期間における中性子の累積照射量は $\square\text{n/cm}^2$ 以下であり、アルミナ及びシリカの結晶構造に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{17}n/cm^2 と比較して十分に小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない ⁴⁾ 。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	化学	セラミックファイバーは無機繊維であり耐食性の高い材料であるため腐食は発生しにくい。またセラミックファイバーは輸送容器内部に使用され、輸送中日光や雨に直接さらされることはないため、腐食等の経年変化の影響は受けない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	疲労	セラミックファイバーには、内外圧差や吊り上げに起因する応力が生じないため、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し

(4)ボロン入りステンレス鋼

ボロン入りステンレス鋼の経年変化の考慮について、表(ロ)F-4に示す。

表(ロ)F-4 ボロン入りステンレス鋼の経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	技術基準への適合性評価時の考慮の必要性
ボロン入りステンレス鋼	熱	使用期間中に想定されるボロン入りステンレス鋼の温度範囲である-40℃から□℃ ((ロ) B.4.6 参照) までを考慮する。ボロン入りステンレス鋼は□%のステンレス鋼と□%のボロンからなるので、基本的な性質はステンレス鋼と変わらない。そのため、ボロン入りステンレス鋼はステンレス鋼と同様に、使用期間中に想定される温度範囲では、組織変化、クリープ、割れ等の経年変化の影響は受けない。以上のことから経年変化の考慮は必要なく、輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において、PWR燃料集合体2体(濃縮度□%、ウラン量は2体で□kg-U)を収納するものとして条件を定める。 ボロン入りステンレス鋼は□%のステンレス鋼と□%のボロンからなるので、中性子照射に対する性質はステンレス鋼と同等である。使用期間における中性子の累積照射量は□n/cm ² 以下であり、ステンレス鋼の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量10 ¹⁶ n/cm ² と比較して十分に小さい。加えて累積の中性子照射による ¹⁰ Bの減損率は□未満であり、中性子吸収性能への影響はなく、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから経年変化の考慮は必要なく、輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	化学	ボロン入りステンレス鋼はステンレス鋼と同様に材料の表面に不動態膜を形成することから腐食は発生しにくい。またボロン入りステンレス鋼は輸送容器内部で使用され、輸送中日光や雨に直接さらされることはないため、腐食等の経年変化の影響は受けない。以上のことから経年変化の考慮は必要なく、輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し
	疲労	ボロン入りステンレス鋼の使用箇所には、内外圧差や取扱いに起因する応力は生じないため、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから経年変化の考慮は必要なく、輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はない。	無し

(5)ブチルゴム

ブチルゴムの経年変化の考慮について、表(ロ)F-5に示す。

表(ロ)F-5 ブチルゴムの経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	技術基準への適合性評価時の考慮の必要性
ブチルゴム	熱	使用期間中に想定されるブチルゴムの温度範囲である -40°C から $\square^{\circ}\text{C}$ ((ロ)B.4.6 参照) までを考慮する。ブチルゴムの使用可能温度は 150°C であり、使用期間に想定される温度と比較し十分に高いことから、組織変化等ブチルゴムの機械特性に影響を与えるような経年変化の影響は受けない ⁵⁾ 。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	放射線	15年の使用期間において、PWR燃料集合体2体(濃縮度 $\square\%$ 、ウラン量は2体で $\square\text{kg-U}$)を収納するものとして条件を定める。使用期間における中性子の累積照射量は $\square\text{n/cm}^2$ 以下であり、ブチルゴムの材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{15}n/cm^2 と比較して十分小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない ⁶⁾ 。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	化学	ブチルゴムは輸送容器内部で使用され、輸送中日光や雨に直接さらされることはないため、腐食等の経年変化の影響は受けない。また、容器に使用されているブチルゴムは定期自主検査及び発送前検査の外観検査において確認が可能であり、有害な傷、割れ等の異常が確認された場合は交換する。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	疲労	防振構造物(ショックマウントフレーム及び燃料集合体)の長期荷重や輸送中の振動がショックマウントに発生するため経年変化についての考慮が必要となる。荷重変位試験より繰り返し使用されたショックマウントの剛性を確認し、経年変化の影響を受けたショックマウントにおいても落下エネルギーが十分吸収され安全機能が担保されることを確認する(参考資料(ロ)-A.6参照)。	有り

(6)ポリエチレン

ポリエチレンの経年変化の考慮について、表(ロ)F-6 表(ロ)F-4 に示す。

表(ロ)F-6 ポリエチレンの経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	技術基準への適合性評価時の考慮の必要性
ポリエチレン	熱	使用期間中に想定されるポリエチレンの温度範囲である -40°C から $\square^{\circ}\text{C}$ ((ロ)B.4.6 参照) までを考慮する。ポリエチレンの使用可能温度は 80°C であり、使用期間に想定される温度と比較し十分に高いことから、組織変化等ポリエチレンの機械特性に影響を与えるような経年変化の影響は受けない ⁷⁾ 。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	放射線	80年の使用期間において、PWR燃料集合体2体(濃縮度 $\square\%$ 、ウラン量は2体で $\square\text{kg-U}$)を収納するものとして条件を定める。使用期間における中性子の累積照射量は $\square\text{n/cm}^2$ 以下であり、ポリエチレンの材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{15}n/cm^2 と比較して十分小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない ⁸⁾ 。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	化学	ポリエチレンは収納物である燃料棒組立体内で使用され、輸送中日光や雨に直接さらされることはないため、腐食等の経年変化の影響は受けない。また、燃料棒組立体に使用されているポリエチレンは発送前検査の収納物検査において確認が可能であり、有害な傷、割れ等の異常が確認された場合は交換する。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し
	疲労	ポリエチレンには、内外圧差や吊り上げに起因する応力が生じないため、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから、経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要はない。	無し

F.3 安全解析における経年変化の考慮内容

前節に示した通り、本輸送物に係る安全機能を担う構成部品を対象に、経年変化の考慮の必要性について評価を行った。

その結果、セラミックファイバー、ボロン入りステンレス鋼及びポリエチレンに対しては、使用期間中の経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要がなく、ステンレス鋼、クロムモリブデン鋼及びブチルゴムに対しては熱、放射線、化学における経年変化要因においては、使用期間中の経年変化の影響について、技術上の基準に適合していることを確認する上で考慮する必要がないことを確認した。

ステンレス鋼及びクロムモリブデン鋼については内外圧力差および吊り上げによって繰り返し応力が発生するため、疲労による経年変化を考慮する必要がある。使用期間中に想定される最も厳しい応力条件かつ保守的な繰り返し回数を考慮した上で内外圧差による疲労を評価したところ、使用期間において疲労破壊は発生せず、輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はないことを確認した。

ブチルゴムにおいては、防振構造物の長期荷重及び振動が発生するため、疲労による経年変化を考慮する必要がある。疲労により経年変化の影響を受けたショックマウントのゴム剛性を考慮し、1.2m 落下時に燃料集合体へ与えられる加速度を評価したところ、「A.9.2.1 強度試験・落下試験 I (9m 落下時)」で述べられる落下試験での加速度よりも小さく、ショックマウントが緩衝体としての役割を十分に果たしていることがわかる。また 9 m 落下においては、バネ剛性の増加が輸送容器内壁と防振構造物との衝撃の緩和に寄与することから、経年変化の影響によるゴム剛性の増加が収納物への健全性に影響しないことが確認できる。よって使用期間において安全機能を十分に担保し輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はないことを確認した。

参考文献

- (1)R. K. Nanstad, K. Farrell, D. N. Braski, and W. R. Corwin “Accelerated Neutron Embrittlement of Ferritic Steels at Low Fluence: Flux and Spectrum Effects” (1988)
- (2)奥 達雄、菊山 紀彦、深谷 清、古平 恒夫著「多目的高温ガス実験炉用 2 1/4 Cr-Mo 鋼の機械的性質に関するデータの調査」(1978 年 11 月)
- (3)山下 光雄、若松 盈「高温断熱材としてのアルミナ繊維」(1983 年)
- (4)福谷 耕司、寺沢 倫孝、小沢 国夫「セラミック絶縁材料の放射線効果に関するデータ収集(新データの追加および評価による改正版)」(1987 年 12 月 25 日)
- (5)産業技術センター「複合材料技術集成」(1976 年)
- (6)C. D. Bopp, O. Sisman “RADIATION STABILITY OF PLASTICS AND ELASTOMERS” (July 23, 1953)
- (7)大澤 善次郎「高分子劣化・長寿命化ハンドブック」(2011 年 7 月 25 日)
- (8)日本原子力研究所「原子力産業に要求される高分子材料」(1981 年 3 月)

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第四条 第一号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材質、構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、輸送物総重量は\square以下である。本輸送容器には吊部を設けており、クレーンやチェーンブロック等により容易かつ安全に吊上げることができる。また、吊部の評価において、適切な安全係数を考慮した吊上荷重に耐えることを確認するとともに、第三条第三項で述べたように使用予定よりも保守的な繰り返し回数の吊上荷重が掛かったとしても耐えることを確認している。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p>	(イ)-C (ロ)-A.4.4
第四条 第二号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材質、構造に変更はない。そのため、以下に示すように運搬中に予想される輸送容器の温度・内圧の変化及び振動を考慮しても、技術基準が適合することに变更はない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・輸送時の周囲温度は$-40^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$である。輸送容器の最低温度は周囲温度と同じ$-40^{\circ}\text{C}$、最高温度は太陽熱放射の影響を考慮した熱解析結果から$\square^{\circ}\text{C}$である。 ・運搬中に予想される周囲温度の変化によって、輸送物の温度上昇は小さく、また構造材が金属で熱伝導が良いので、輸送容器各部の温度差は小さく、温度差による熱膨張差は発生しない。 ・梱包時温度を0°C、燃料棒温度を$\square^{\circ}\text{C}$とし、周囲の圧力が絶対圧で60kPaまで低下した場合の燃料棒の最大内外圧差は$\square\text{MPa}$であるが、被覆管に発生する応力は基準値より小さいことから、亀裂、破損等は生じない。また、梱包時温度0°Cから容器温度$\square^{\circ}\text{C}$まで温度変化したことによる輸送容器の最大内外圧力差は$\square\text{MPa}$、燃料棒の内外圧差は$\square\text{MPa}$であるが、輸送容器及び被覆管に発生する応力はいずれも基準値より小さいことから輸送容器に亀裂・破損等は生じない。なお、輸送容器に関しては、第三条第三項で述べたように使用予定よりも保守的な繰り返し回数の内外圧差の応力が発生しても、疲労破壊は生じないことを確認している。 ・輸送中は運搬中、車両等に固定され、輸送物の最大重量及び運搬中に予想される加速度を考慮しても、輸送容器に発生する応力は基準値より小さいことから輸送物の健全性は確保される。 	(ロ)-B.4.2 (ロ)-B.4.3 (ロ)-A.5.1.2 (ロ)-A.4.6 (ロ)-B.4.2 (ロ)-A.5.1.3 (ロ)-A.5.1.5 (ロ)-A.4.7
第四条 第三号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材質、構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、以下に示すように不要な突出物はない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・輸送容器の内側には顕著な突出物はない。 ・輸送容器の外側への突出物はフォークリフト等で持ち上げるためのリフトガイド、クレーン用の吊り上げ孔を有するスタッキングブラケット及び輸送容器本体の緩衝材となるスキッドがあるが、いずれも取扱いに必要なものである。 <p>また、既認可と同じく、輸送物表面はステンレス鋼製板で構成されているため除染は容易である。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p>	(イ)-C(11) (イ)-C(6)

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第四条 第四号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材質、構造に変更はなく、輸送容器の構成部品は化学的に安定した材料を使用していることから、材料相互の接触による危険な物理的作用又は化学反応が生じるおそれのないことに変更はない。</p> <p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。したがって、既認可と同じく、輸送容器と収納物については、輸送容器の上下部ゲートに取付けたシリコンゴム製の緩衝材によって熱膨張差が吸収されるため、応力は発生しない。そのため、危険な物理的作用が生じるおそれのないことに変更はない。</p> <p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。したがって、既認可と同じく、輸送容器及び収納物に使用されているステンレス鋼、ジルカロイ合金等は化学的に安定した材料であるため、危険な化学的反応が生じるおそれのないことに変更はない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物は規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(ロ)－A.4.1 (ロ)－A.5.1.2 (ロ)－A.4.1
第四条 第五号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送物には弁やバルブに相当するものはないため、規則に定める技術基準に該当しない。</p>	(イ)－C(10)
第四条 第八号	第九条	<p>設計変更において、既認可と同じく、表面密度限度を確認することとを定めている。収納物の表面の放射性物質の密度は任意の場所をとっても告示第九条で定められた表面密度限度（α線を放出する核種：0.4Bq/cm²、α線を放出しない核種：4Bq/cm²）を超えないことを確認することとしている。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(ハ)－A.2
第四条 第十号		<p>設計変更においては、既認可と同じく、核燃料物質等の使用等に必要物品以外のものを収納していないことを確認の上で輸送を行う。</p> <p>以上のことから、当該輸送物は規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(ハ)－A.2
第五条 第二号		<p>設計変更においては、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送物の外寸法は、次のとおり10cm以上である。</p> <p>(長さ) 約□cm × (幅) 約□cm × (高さ) 約□cm</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(イ)－C(6)
第五条 第三号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造及び封印の運用方法に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送物の上側ケースと下側ケースはボルトにより締付けており、ボルトを外すにはレンチ等の工具が必要となり、更に上側ケースを外すには揚重機が必要となるため、誤操作により開かれる恐れはない。また、輸送容器に封印を施すことにより、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なっている。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに変更はない。</p>	(ロ)－A.4.3 (ハ)－A.1

規則の項目	告示の項目	説 明	申請書記載 対応項目
第五条 第四号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料に変更はない。本輸送物における運転中に予想される温度範囲は-40°C～$\square^{\circ}\text{C}$であり、構成部品に使用する材料（ステンレス鋼）は、運搬中に予想される温度範囲（-40°Cから$\square^{\circ}\text{C}$）において、著しい強度の低下や脆化等がなく、必要とされる材料強度等に影響しない。そのため、既認可と同じく亀裂・破損が生じるおそれはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術上の基準に適合することに变更はない。</p>	(ロ)－B.4.6 (ロ)－A.4.2 参考資料(ロ)－A.4
第五条 第五号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物の材料、構造に変更はない。</p> <p>周囲の圧力が絶対圧で 60kPa まで低下した場合の被覆管の最大内外圧差は$\square\text{MPa}$であるが、被覆管に発生する応力は基準値より小さいことから、被覆管に亀裂、破損等は生じない。そのため、既認可と同じく、輸送物から放射性物質が漏えいするおそれはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p>	(ロ)－A.4.6
第五条 第六号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、本輸送容器には液体状の核燃料物質等を収納しないため、技術基準に該当しない。</p>	(イ)－D
第五条 第七号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料・構造、及び収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、最も線源強度が高くなる条件として、燃料集合体 2 体を収納し、線源強度が最も高くなるウラン同位体条件を考慮した上で、QAD－CGGP2R コードによる遮蔽解析を実施したところ、輸送物表面の線量当量率は$\square\text{Sv/h}$以下であり、2 mSv/h を超えることはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p>	(ロ)－D.1 (ロ)－D.2.1
第五条 第八号		<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料・構造、及び収納物に変更はない。</p> <p>したがって、既認可と同じく、最も線源強度が高くなる条件として、燃料集合体 2 体を収納し、線源強度が最も高くなるウラン同位体条件を考慮した上で、QAD－CGGP2R コードによる遮蔽解析を実施したところ、輸送物表面から 1m 離れた位置における線量当量率は$\square\text{Sv/h}$以下であり、$100\mu\text{Sv/h}$ を超えることはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p>	(ロ)－D.1 (ロ)－D.2.1

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
第五条 第九号 (イ)	第十三条 及び 別記第三	設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造、総重量に変更はない。 したがって、既認可と同じく、下記に示す通り外運搬告示第十三条に掲げる条件下に置いた場合でも、放射性物質の漏えいはない。 以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。	
		<u>別記第三の第一号 (イ)</u> 本輸送容器は耐食性の高いステンレス鋼板で覆われ、接合部は連続溶接されている。本輸送容器は密閉容器であるため、水噴霧によって容器内へ水が侵入することはない。したがって、水噴霧による材料劣化は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも燃料棒の密封性は保たれ、放射性物質が漏えいするおそれはない。	(ロ)－A.5.2
		<u>別記第三の第一号 (ロ) (1)</u> 落下高さ 1.2m の自由落下を考慮した解析の結果、変形は衝突面のみの局所的なものであり、健全性は保たれる。また、自由落下試験より厳しい落下試験I においても燃料棒の密封性が保たれることを考慮すると、燃料棒の密封性は保たれ、放射性物質が漏えいするおそれはない。	(ロ)－A.5.3
		<u>別記第三の第一号 (ロ) (2)</u> 本輸送物の材料、重量は本告示の項目に該当しない。	(イ)－C
		<u>別記第三の第一号 (ロ) (3)</u> 解析の結果、総重量の 5 倍に相当する荷重条件を考慮しても輸送容器に変形は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも、燃料棒の密封性は保たれ、放射性物質が漏えいするおそれはない。	(ロ)－A.5.4
		<u>別記第三の第一号 (ロ) (4)</u> 試験の結果、6kg 丸棒を 1m 高さから落下させても輸送容器の外板は貫通しない。そのため、本条件下に置いた場合でも、燃料棒の密封性は保たれ、放射性物質の漏えいするおそれはない。	(ロ)－A.5.5
第五条 第九号 (ロ)	第十三条 及び 別記第三	設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の材料・構造、及び収納物に変更はない。 したがって、既認可と同じく、下記に示す通り外運搬告示第十三条に掲げる条件下に置いた場合でも、表面における最大線量当量率は著しく増加せず、かつ 2mSv/h を超えることはない。 以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。 最も線源強度が高くなる条件として、燃料集合体 2 体を収納し、線源強度が最も高くなるウラン同位体条件を考慮した上で、一般の試験条件下における寸法変更として外筒、内筒ともに □ mm ずつ径方向に一様に変形したものとし、軸方向には外筒のみ片側 □ mm ずつ縮むものとした上で、QAD－CGGP2R コードによる遮蔽解析を実施したところ、輸送物表面の線量当量率は □ Sv/h 以下であり、2 mSv/h を超えることはない。また、線量当量率の増加割合は約 □ % である。	(ロ)－D.1 (ロ)－D.3.1.2
第十一条		第三条第三項の技術上の基準に対する説明の通り、経年変化に対する輸送物への影響はなく、規則に定める技術基準の適合に影響しない。	(ロ)－F
	第二十三条	設計変更において、適合性判断を行う条件となる収納物に変更はない。 したがって、既認可と同じく、本輸送物は、15 g 以上のウラン 235 を輸送することから、本輸送物が技術基準における核分裂性輸送物に該当することに变更はない。	(イ)－D

規則の項目	告示の項目	説明	申請書記載 対応項目
<p>第十一条 第一号 (イ)</p>	<p>第二十四条 及び 別記第十一</p>	<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造、総重量に変更はない。したがって、既認可と同じく、下記に示す通り外運搬告示第二十四条に掲げる条件下に置いた場合でも、容器の構造部に一辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じない。 以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (イ)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、水噴霧による輸送物内外の材料劣化は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも容器の構造部に一辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (1)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、落下高さ 1.2m の自由落下を考慮した解析において、輸送容器の変形は局所的であり 1 辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも容器の構造部に一辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (3)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、解析の結果、総重量の 5 倍に相当する荷重条件でも輸送容器に変形は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも容器の構造部に一辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (4)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、試験の結果、6kg 丸棒を 1m 高さから落下させても輸送容器の外板は貫通しない。そのため、本条件下に置いた場合でも容器の構造部に一辺 10cm の立方体を包含するようなくぼみは生じない。</p>	<p>(ロ)A.5.2</p> <p>(ロ)A.5.3</p> <p>(ロ)A.5.4</p> <p>(ロ)A.5.5</p>
<p>第十一条 第一号 (ロ)</p>	<p>第二十四条 及び 別記第十一</p>	<p>設計変更において、適合性判断を行う条件となる輸送容器の構造、総重量に変更はない。したがって、既認可と同じく、下記に示す通り外運搬告示第二十四条に掲げる条件下に置いた場合でも、外接する直方体の各辺は 10cm 以上である。 以上のことから、当該輸送物が規則に定める技術基準に適合することに变更はない。</p> <p><u>別記第三の第一号 (イ)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、水噴霧による輸送物内外の材料劣化は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも外接する直方体の各辺は 10cm 以上である。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (1)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、落下高さ 1.2m の自由落下を考慮した解析において、輸送容器の変形は局所的であった。そのため、本条件下に置いた場合でも外接する直方体の各辺は 10cm 以上である。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (3)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、解析の結果、総重量の 5 倍に相当する荷重条件でも輸送容器に変形は生じない。そのため、本条件下に置いた場合でも外接する直方体の各辺は 10cm 以上である。</p> <p><u>別記第三の第一号 (ロ) (4)</u> 第五条第九号(イ)において説明の通り、試験の結果、6kg 丸棒を 1m 高さから落下させても輸送容器の外板は貫通しない。そのため、本条件下に置いた場合でも外接する直方体の各辺は 10cm 以上である。</p>	<p>(ロ)A.5.2</p> <p>(ロ)A.5.3</p> <p>(ロ)A.5.4</p> <p>(ロ)A.5.5</p>

(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

輸送物の代表的な取扱い方法を以下に示す。輸送物は取扱施設に適用される法令、規定及び設備上の制限に従った運用を行わなければならないことから、必要により下記取扱い方法と異なる運用を行う場合もある。代表的な取扱いフローを図(ハ)-1に示す。

A.1 装荷方法

A.1.1 燃料集合体装荷

燃料集合体の装荷は、下記の手順例に従って実施する。各手順ごとに検査、試験及び特別な準備事項を記述する。ただし、必要に応じ手順を変更することがある。

No.	作業内容	注意事項
1	空容器を梱包実施場所へ運び込む。	輸送容器の長手方向は、フック移動方向と平行であること。
2	上側ケースと下側ケースを止めているロッドボルトを外す。	
3	クレーンを用いて上側ケースを吊り上げ、所定の位置に置く。	上側ケースのフランジ面を傷つけないように上側ケースの下に緩衝材を置くこと。
4	空容器内面の表面汚染密度の測定を行う。	
5	固定脚を下側ケースに取付ける。	
6	トグルクランプを下側ケースに固定する。	安全ピンをトグルクランプに差し込むこと。
7	ショックマウントフレームとストロングバックを止めているロッドボルトを外す。	
8	弓型クランプを止めているロッドボルトを、外し、弓型クランプをフリーにし、上部ゲートも開く。	
9	クレーンを用いてストロングバックのシャックル位置にフックをかける。	吊りワイヤとシャックルを使用のこと。ロープの取付けも行う。
10	クレーンでストロングバックを垂直位置に起こす。	
		吊りワイヤが常に垂直位置にあるように起こすこと。また、ストロングバックが垂直位置を超えないよう注意すること。

No.	作業内容	注意事項
11	サポートチューブ2本をストロングバックに取付けて下側ケースと固定する。	
12	クレーンをストロングバックより離す。	
13	弓型クランプを開き集合体を受け入れられるようにする。	
14	所定の燃料集合体を保管ラックより取出し輸送容器に移動する。	集合体を損傷しないよう注意すること。
15	弓型クランプにより燃料集合体を固定する。	必要箇所を弓型クランプで固定する。
16	2体目の燃料集合体を同一手順で装着する。	手順は No.14→No.15 のとおり。
17	クレーンに吊りワイヤを装着しストロングバックに取付ける。ロープの取付けも行う。	
18	サポートチューブを取外し、ストロングバックを垂直位置から水平位置に戻す。 手順は 9→10→11→12 の逆にする。	
19	ストロングバックがショックマウントフレームに正常に乗っているか確認する。	
20	ストロングバックをショックマウントフレームにロッドボルトを用いて固定する。	締付トルクを管理する。
21	弓型クランプをストロングバックにロッドボルトを用いて取付ける。	締付トルクを管理する。
22	トグルクランプを外す。	
23	固定脚を取外す。	
24	燃料集合体のポリエチレン袋に乾燥剤を入れる。	必要に応じて実施する。
25	ポリエチレン袋をポリシーラーで密封する。	必要に応じて実施する。
26	上部ゲートの固定を行う。	締付トルクを管理する。
27	加速度計、変位計の確認を行う。	必要に応じ取替え又はリセットを行うこと。
28	梱包時検査を行う。	

No.	作 業 内 容	注 意 事 項
29	上側ケースを下側ケースにかぶせる。	ガスケット面は清浄にしておくこと。
30	ロッドボルトを締めて、上側ケースと下側ケースを固定する。	締付トルクを管理する。
31	輸送容器内部を不活性ガス等で加圧する。	必要に応じて実施する。
32	加圧後、ロッドボルトの増締めを行う。	締付トルクを管理する。
33	両端 2 個所に封印をする。	
34	加圧してから 24 時間後に内部圧力を点検し、有意な漏れが確認された場合は、漏れ箇所を探し処置する。	内部を加圧した場合に実施する。 漏れの止まらない場合は上側ケースを外しガスケット面を点検し、再度加圧する。
35	梱包後検査を行う。	
36	所定の保管位置にトラックへの積込みまで保管する。	取扱いは慎重に行うこと。

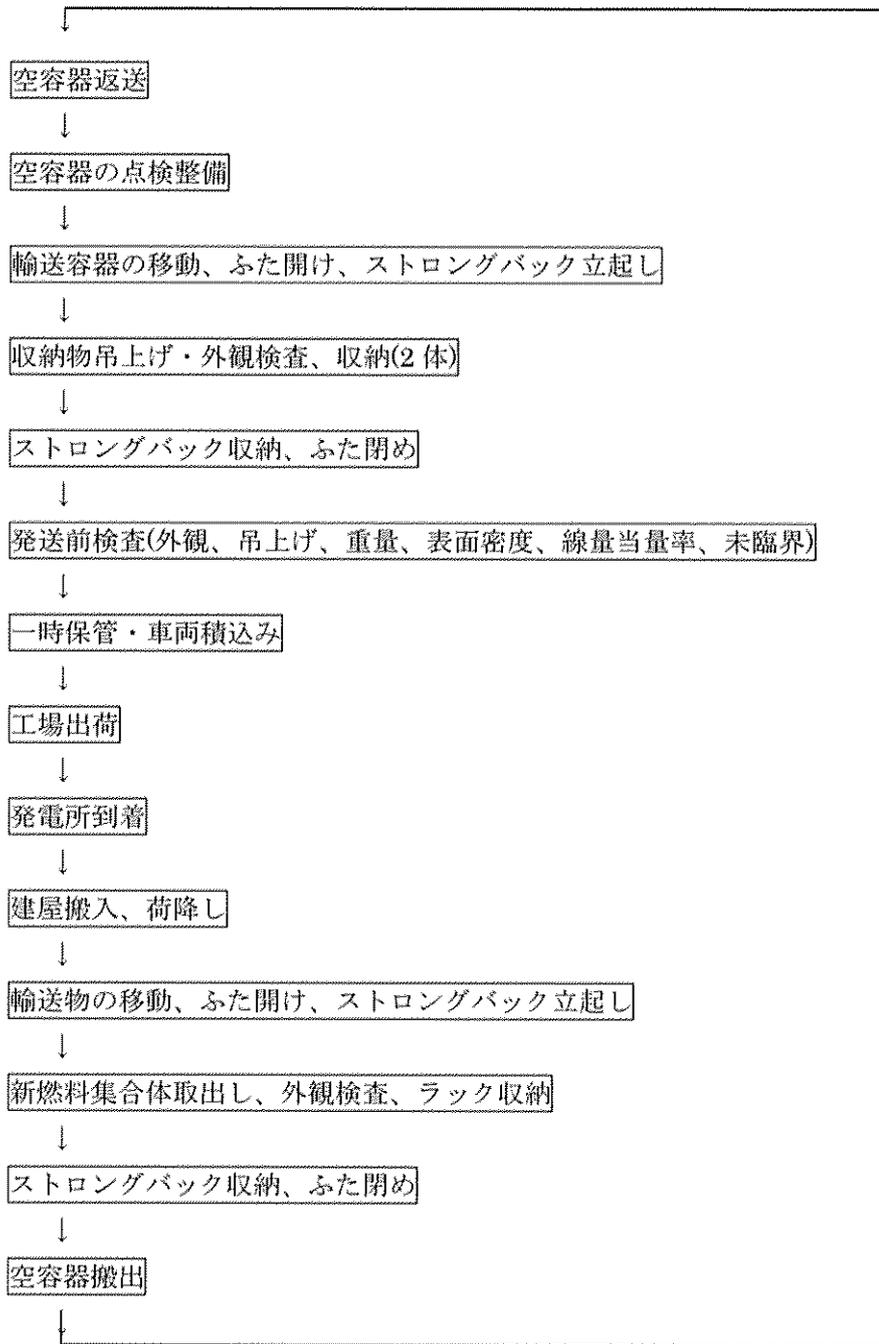
A.1.2 燃料棒組立体装荷

燃料棒組立体の装荷は、下記の手順例に従って実施する。各手順ごとに検査、試験及び特別な準備事項を記述する。ただし、必要に応じ手順を変更することがある。

No.	作業内容	注意事項
1	空容器を梱包実施場所へ運び込む。	輸送容器の長手方向は、フック移動方向と平行であること。
2	上側ケースと下側ケースを止めているロッドボルトを外す。	
3	クレーンを用いて上側ケースを吊り上げ、所定の位置に置く。	上側ケースのフランジ面を傷つけないように上側ケースの下に緩衝材を置くこと。
4	空容器内面の表面汚染密度の測定を行う。	
5	固定脚を下側ケースに取付ける。	ターンバックルを利用して床面にしっかりと固定すること。
6	トグルクランプを下側ケースに固定する。	安全ピンをトグルクランプに差し込むこと。
7	ショックマウントフレームとストロングバックを止めているロッドボルトを外す。	
8	弓型クランプを止めているロッドボルトを、外し、弓型クランプをフリーにし、上部ゲートも開く。	
9	クレーンを用いてストロングバックのシャックル位置にフックをかける。	吊りワイヤとシャックルを使用のこと。ロープの取付けも行う。
10	クレーンでストロングバックを垂直位置に起こす。	吊りワイヤが常に垂直位置にあるように起こすこと。また、ストロングバックが垂直位置を超えないよう注意のこと。

No.	作業内容	注意事項
11	サポートチューブ2本をストロングバックに取付けて下側ケースと固定する。	
12	クレーンをストロングバックより離す。	
13	弓型クランプを開き燃料棒組立体を受け入れられるようにする。	
14	燃料棒組立体(上下部ノズル、構造材のみ)を輸送容器内に移動する。	燃料棒組立体を損傷しないよう注意すること。
15	弓型クランプにより燃料棒組立体(上下部ノズル、構造材のみ)を固定する。	必要箇所を弓型クランプで固定する。
16	2体目の燃料棒組立体(上下部ノズル、構造材のみ)を同一手順で装着する。	手順は No.14→No.15 のとおり。
17	クレーンに吊りワイヤを装着しストロングバックに取付ける。ロープの取付けも行う。	
18	サポートチューブを取外し、ストロングバックを垂直位置から水平位置に戻す。 手順は 9→10→11→12 の逆にする。	
19	ストロングバックがショックマウントフレームに正常に乗っているか確認する。	
20	ストロングバックをショックマウントフレームにロッドボルトを用いて固定する。	締付トルクを管理する。
21	トグルクランプを外す。	
22	固定脚を取外す。	
23	弓型クランプを開放する。	
24	燃料棒及び支持構造を燃料棒組立体(上下部ノズル、構造材のみ)の中に配置する。	必要に応じて実施する。
25	弓形クランプをストロングバックにロッドボルトを用いて取付ける。	必要に応じて実施する。
26	上部ゲートの固定を行う。	締付トルクを管理する。
27	加速度計、変位計の確認を行う。	必要に応じて取替え又はリセットを行うこと。
28	梱包時検査を行う。	

No.	作業内容	注意事項
29	上側ケースを下側ケースにかぶせる。	ガスケット面は清浄にしておくこと。
30	ロッドボルトを締めて、上側ケースと下側ケースを固定する。	締付トルクを管理する。
31	輸送容器内部を不活性ガス等で加圧する。	必要に応じて実施する。
32	加圧後、ロッドボルトの増締めを行う。	締付トルクを管理する。
33	両端 2 個所に封印をする。	
34	加圧してから 24 時間後に内部圧力を点検し、有意な漏れが確認された場合は、漏れ箇所を探し処置する。	内部を加圧した場合に実施する。 漏れの止まらない場合は上側ケースを外しガスケット面を点検し、再度加圧する。
35	梱包後検査を行う。	
36	所定の保管位置にトラックへの積込みまで保管する。	取扱いは慎重に行うこと。



図(ハ)・1 輸送物の取扱いフロー例

A.1.2 輸送物の取扱い

輸送容器に収納物を装荷した後の輸送物の取扱いは、以下に記述する方法の内どちらかとする。

(1) フォークリフトによる移動

最大積載荷重 4.0 トン以上のフォークリフトを用いて、リフトガイド（図(イ)- 1 参照）を使用して取扱う。

(2) クレーンによる移動

容量 4.0 トン以上のクレーンを用いて、吊り具による吊り上げ移動を行う、この場合、使用する吊り具は所定の強度を有する検定済のものを用い、輸送容器本体の吊り位置は、スタッキングブラケットに設けられた吊り孔とする。

(3) パレットトラックによる移動

前後方向から輸送容器脚間、もしくは側面から適切な位置にパレットトラックを挿入して取扱う。

(4) 車両による移動

車両に輸送容器並びに輸送物を積載して事業所内等を運搬する。この場合、転倒しないように措置をする。

A.2 核燃料輸送物の発送前検査

輸送物の発送の都度行う試験、検査は、以下のとおりである。

検査項目	検査方法	合格基準
収納物検査	基準を満足していることを、検査記録、測定記録、証明書、現物確認等の適切な方法によって確認する。	1.外観：異常がないこと。 2.種類：軽水炉(PWR)用新燃料集合体又は新燃料棒組立体 3.性状：固体 4.数量：2体以下 5.収納物重量： <input type="text"/> kg以下 6.UO ₂ 重量： <input type="text"/> kg以下 7.放射能量： <input type="text"/> Bq以下 8.濃縮度： <input type="text"/> %以下 9.濃縮ウランの種類： 濃縮ウラン(再生濃縮ウランを除く：ASTM C996-04 ECGUに準拠) $^{232}\text{U} \leq 0.0001 \mu\text{g/gU}$ $^{234}\text{U} \leq 10 \times 10^3 \mu\text{g/g}^{235}\text{U}$ $^{236}\text{U} \leq 250 \mu\text{g/gU}$ $^{99}\text{Te} \leq 0.01 \mu\text{g/gU}$ ただし、 $^{236}\text{U} < 125 \mu\text{g/gU}$ の場合は、 ^{232}U 及び ^{99}Te は適用外 10. 核燃料物質等の使用等に必要な物品以外のものが収納されていないこと。
外観検査	輸送物の外観を目視で検査する。	傷、割れがなく、形状に異常がないこと。 封印(2箇所)がされていること。
吊上げ検査	容器を吊り上げた状態において外観を検査する。	吊り上げ装置に異常がないこと。
重量検査	輸送物の総重量を重量測定記録により確認する。	収納状態で総重量が <input type="text"/> kg以下
表面密度検査	スマイヤ法により輸送物の表面汚染密度を検査する。	α 線を放出する核種：0.4 Bq/cm ² 以下 α 線を放出しない核種：4 Bq/cm ² 以下
線量当量率検査	核燃料物質等を収納した状態において線量当量率をサーベイメータで検査する。	輸送物表面：2 mSv/h以下 輸送物表面から1 m離れた位置：100 μ Sv/h以下
未臨界検査	形状等を目視により検査する。	容器の外側形状に著しい変形のないこと。中性子吸収材が取付けられていること及び著しい損傷、変形のないこと。

上記の検査の他、輸送に先立ち以下の項目につき適宜確認を行う。

- (1) 容器フランジ面及びガスケットの損傷、劣化状況の確認
- (2) 加速度計、レリーフバルブ、エアバルブの作動確認
- (3) 各種クランプ、安全ピン等の作動確認
- (4) 構成部品の取付け及び溶接状況の目視確認
- (5) 容器内外面の放射線レベルの検査

A.3 取出し方法

A.3.1 燃料集合体の取出し方法

燃料集合体の輸送容器からの取出しは下記の手順例に従って実施する。ただし、必要に応じ手順を変更することがある。

No.	作 業 内 容	注 意 事 項
1	輸送容器を外観検査し、損傷の有無を確認する。 また、輸送容器の線量当量率及び表面汚染密度の測定を行う。	輸送容器の長手方向は、フック移動方向と平行であること。
2	クレーンで輸送容器を吊り上げ、所定の開梱場所にゆっくりと降す。	
3	固定脚を下側ケースに取付ける。	
4	下記の検査を行う。 ・外 観 ・封 印 ・ロッドボルトの外れ	
5	バルブカバーを取外し、圧力を確認してからエアバルブを開いて圧力を抜く（加圧されていない場合も、まず弁を開いて輸送容器内外の圧力をバランスさせること）	

No.	作業内容	注意事項
6	内外圧力がバランスしたら、輸送容器の上側ケースを締付けているロッドボルトを外す。上側ケースの封印も取除く。	
7	上側ケースをクレーンで吊り上げる。	
8	ガスケットが外れていないか確認し、外れている場合は所定の溝にセットする。	
9	上側ケースを吊り上げた状態で、上側ケース内面の汚染密度の測定を行う。	
10	上側ケースを移動させ、所定の仮置場所に降す。	上側ケースのフランジ面を傷つけないように上側ケースの下に緩衝材を置くこと
11	荷くずれ、容器内部損傷の有無を検査し、記録する。また、加速度計、変位計及び上・下部ゲートの緩みをチェックする。	
12	容器内面の汚染密度の測定を行う。	
13	移動足場を輸送容器前のマーキング位置に置く。	車輪止めは確実にすること。
14	トグルクランプを下側ケースに固定する。	安全ピンをトグルクランプに差し込むこと。
15	ショックマウントフレームとストロングバックを止めているロッドボルトを外す。	
16	上部ゲートを緩める。上部ノズルを検査する。	

No.	作業内容	注意事項
17	ストロングバック上部の金具に、吊上用ワイヤを取付ける。同時にロープも取付ける。	
18	マークをした弓型クランプを除いて締め付けボルトを緩める。	マークをした弓型クランプは縮ったままであることを確認する。
19	クレーンを緩やかに吊上げストロングバックを起こす。	ロープを引っ張りながら吊上げ、ストロングバックの立起こし中、安定を保つようにする。
20	サポートチューブ 2 本をストロングバックに取付けて下側ケースと固定する。	
21	クレーンをストロングバックより離す。	
22	燃料集合体取扱工具を秤、吊上用ワイヤ、シャックル、より戻しを用いてクレーンフックに吊り下げて、これを燃料集合体の上部ノズルに装着し、ロックする。	クレーンセンターが集合体中心と一致していることを確認する。作業中に燃料集合体に傷をつけないよう慎重に装着する。装着後必ずロックすること。
23	マークをしていない弓型クランプを開放する。	
24	燃料集合体取扱工具に取付けられたスケールの示す荷重が 100～200 kg 程度になるまで吊り上げた状態で、残りの弓型クランプを開放する。	
25	燃料集合体を手で支えながら下部ノズルが下部ゲートより約 50 mm 吊り上げられた後、ストロングバックより吊り出しを行なう。	
26	移動足場を後方にずらす。	
27	燃料集合体を吊り上げて水平に移動させ、所定位置に収納する。	集合体を損傷しないよう注意すること

A.3.2 燃料棒組立体の取出し方法

燃料棒組立体の輸送容器からの取出しは下記の手順例に従って実施する。ただし、必要に応じ手順を変更することがある。

No.	作 業 内 容	注 意 事 項
1	輸送容器を外観検査し、損傷の有無を確認する。 また、輸送容器の線量当量率及び表面汚染密度の測定を行う。	輸送容器の長手方向は、フック移動方向と平行であること。
3	クレーンで輸送容器を吊り上げ、所定の開梱場所の支持台にゆっくりと降す。	
4	固定脚を下側ケースに取付ける。	
5	下記の検査を行う。 ・外 観 ・封 印 ・ロッドボルトの外れ	
6	バルブカバーを取外し、圧力を確認してからエアバルブを開いて圧力を抜く（加圧されていない場合も、まず弁を開いて輸送容器内外の圧力をバランスさせること）	

No.	作業内容	注意事項
7	内外圧力がバランスしたら、輸送容器の上側ケースを締付けているロッドボルトを外す。上側ケースの封印も取除く。	
8	上側ケースをクレーンで吊り上げる。	
9	上側ケースを吊り上げた状態で、内面の汚染密度の測定を行う。	
10	上側ケースを移動させ、所定の仮置場所に降す。	上側ケースのフランジ面を傷つけないように上側ケースの下に緩衝材を置くこと。
11	荷くずれ、容器内部損傷の有無を検査し、記録する。また、加速度計、変位計及び上・下部ゲートの緩みをチェックする。	
12	容器内面の汚染密度の測定を行う。	
13	弓型クランプをすべて緩めて開放する。	
14	燃料棒及び支持構造をすべて取り出し、所定の場所に収納する。	
15	マークをした弓型クランプを締める。	
16	移動足場を輸送容器前のマーキング位置に置く。	車輪止めは確実にを行うこと。
17	トグルクランプを下側ケースに固定する。	安全ピンをトグルクランプに差し込むこと。
18	ショックマウントフレームとストロングバックを止めているロッドボルトを外す。	
19	上部ゲートを緩める。	

No.	作 業 内 容	注 意 事 項
20	ストロングバック上部の金具に、吊上用ワイヤを取付ける。同時にロープも取付ける。	
21	クレーンを緩やかに吊上げストロングバックを起こす。	ロープを引っ張りながら吊上げ、ストロングバックの立起こし中、安定を保つようにする。
22	サポートチューブ 2 本をストロングバックに取付けて下側ケースと固定する。	
23	クレーンをストロングバックより離す。	
24	燃料集合体取扱工具を秤、吊上用ワイヤ、シャックル、より戻しを用いてクレーンフックに吊り下げて、これを燃料棒組立体の上部ノズルに装着し、ロックする。	クレーンセンターが燃料棒組立体中心と一致していることを確認する。作業中に燃料棒組立体に傷をつけないよう慎重に装着する。装着後必ずロックすること。
25	マークをしていない弓型クランプを完全に開放する。	
26	燃料集合体取扱工具に取付けられたスケールの示す荷重が 50 kg 程度になるまで吊り上げた状態で、残りの弓型クランプを完全に開放する。	
27	燃料棒組立体を手で支えながら下部ノズルが下部ゲートより約 50 mm 吊り上げられた後、ストロングバックより吊り出しを行なう。	
28	移動足場を後方にずらす。	
29	燃料棒組立体を吊り上げて水平に移動させ、所定位置に収納する。	燃料棒組立体が損傷しないように注意すること。

A.4 空容器の準備

- (1) 空容器の保管は燃料装荷時に準じて上側ケースを閉めて保管し、保管期間中の内部への埃等の侵入を防止する。
- (2) 基本的に屋内保管を原則とし、やむを得ず屋外保管する場合でも、風雨や埃等に曝されないようシート等で処置する。
- (3) 容器は使用前に必要な応じて収納物に適合した型替えや整備等を行う。
- (4) 容器は使用后、直ちに内外面の表面汚染密度の確認を行い、必要な応じ除染等の処置を行い、保管期間中及び再使用に当たっての不注意な汚染の拡大を未然に防止する。

(ハ)・B 保守条件

輸送容器の保管は屋内で行い、定期自主検査を1年に1回以上（年間の使用回数が10回を超える場合は10回ごとに1回以上）行う。

項 目		方 法	合 格 基 準
B.1	外観検査	容器の外観（含上側ケース、下側ケースの内部、外観）を目視により検査する。	1) 製作図面のとおり部品があり、正しく組み合わされていること。 2) 異常な変形等のないこと。
B.2	耐圧検査	該当せず	—————
B.3	気密漏えい検査	該当せず	—————
B.4	遮蔽検査	該当せず	—————
B.5	未臨界検査	中性子吸収板（ボロン入りステンレス鋼板）の外観を目視により検査する。	異常な変形、割れ等のないこと。
B.6	熱 検 査	該当せず	—————
B.7	吊上検査	上側ケース吊部（スタッキングブラケット）を目視により検査する。	強度を損なうような変形や溶接部の割れのないこと
B.8	作動確認検査	該当せず	—————
B.9	補助系の保守	該当せず	—————
B.10	密封装置の弁、ガスケット等の保守	該当せず	—————

B.11 輸送容器の保管

輸送容器を1年以上の長期間にわたって使用せず、連続的に同じ場所に保管する場合は屋内保管とする。

B.12 記録の保管

製作時検査記録及び定期自主検査記録は、当該輸送容器の使用予定がなく承認登録を廃止するまで保管する。

B.13 その他

構成機器等について下記の点検項目につき、適宜点検し保守を行う。

No.	点 検 項 目	処 置
(1)	ゲート（上・下部）、Uサポート、ストロ ングバック面のゴム	万一損傷したもの、脱落したものがあれば交換 する。
(2)	ガスケット(Oリング)	劣化、損傷したものは交換する。
(3)	溶接箇所	損傷が見つかれば修理を行う。
(4)	トグルクランプの動作	摺動部の研磨等を行う。
(5)	加速度計	損傷が見つかれば交換する。
(6)	ショックマウント	劣化、損傷したものは交換する。 劣化、損傷の有無にかかわらず、10年ごとに 交換する。
(7)	固定脚	ターンバックル等に異常があれば交換する。

(二)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

特になし

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

令和 5 年 6 月

原子燃料工業株式会社

(イ)章 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

(イ)-A 品質マネジメントシステム

申請者である原子燃料工業株式会社（以下、当社と云う。）は、核燃料輸送物設計承認申請書（令和 5 年 6 月 20 日付熊原第 23-018 号）により申請した輸送容器に関し、法令に定める技術上の基準並びに運搬に関する確認の申請書又は容器承認の申請書に示された設計仕様及び製作方法に適合して製作するため、以下のとおり品質マネジメントシステムを当社内に確立し、文書化し、実施し、かつ、維持する。

A.1 品質マニュアル

品質マネジメントシステムにおけるトップマネジメントは社長より権限移譲を受け、熊取事業所長、東海事業所長及びエンジニアリング事業部長の 3 事業部門長が共同で担う。（以下、トップマネジメントと云う。）トップマネジメントは品質マネジメントシステムの適用範囲、品質マネジメントシステムについて確立され文書化された手順及び品質マネジメントシステムのプロセス間の相互関係に関する記述を含む品質マニュアルを作成、維持させる。なお、品質マネジメントシステム業務を規定する品質管理計画はこの品質マニュアルとその下位規定により構築される。

A.2 文書管理

品質マニュアル及びその下位規定により品質マネジメントシステムで必要とされる文書について、承認及びレビュー並びに識別に関する手順を定める。

A.3 品質記録の管理

品質マニュアル及びその下位規定により、読みやすく、識別可能で、検索可能な品質記録を作成、維持するために、品質記録の識別、保管、保護、検索、保管期間及び廃棄に関して必要な管理手順を定める。なお、品質記録には、容器製造者等から提出される品質記録を含むとともに、容器承認及び設計承認の有効期間を考慮した保管期間を定める。

(イ)ーB 申請者の責任

B.1 品質マネジメントシステムにおけるトップマネジメント

トップマネジメントは輸送容器の製作に係る最高責任者として、品質方針を設定し、それを基に(イ)Bー第 1 図に示す関係各部に品質目標を設定させる。また、マネジメントレビューを実施し、品質マネジメントシステムの実施状況をレビューするとともに、その有効性を継続的に改善する責任を負う。

B.2 管理責任者

トップマネジメントは、熊取事業所、東海事業所及びエンジニアリング事業部からそれぞれ管理責任者を任命する。それら管理責任者は本来の職務とは関係なく、各事業部において次の事項の責任と権限を有す。

- (1) 品質マネジメントシステムを確立し、実行し、維持することを確実にする。
- (2) 品質マネジメントシステムの実施状況をトップマネジメントへ報告する。

B.3 熊取事業所品質保証部（以下、熊取品質保証部と云う。）

熊取品質保証部長は、下記の責任及び権限を有する。

- (1) 品質マネジメントシステムの立案と推進
- (2) 内部品質監査及び容器製造者等調達先の品質監査の実施、審査並びに是正処置の指示
- (3) 輸送容器の製造時受入検査、定期自主検査及び発送前検査の実施
- (4) 製造時検査記録の作成
- (5) 是正処置の効果の確認及び報告

B.4 熊取事業所燃料製造部（以下、熊取燃料製造部と云う。）

熊取燃料製造部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 輸送容器の製作、取扱い、保守等に関する文書の作成
- (2) 容器製造者等調達先の技術能力評価及び承認
- (3) 容器製造者等調達先への発注仕様書の作成
- (4) 容器製造者等調達先から提出させる文書の審査及び承認
- (5) 輸送容器の製作の管理
- (6) 核燃料輸送物の輸送の管理

B.5 エンジニアリング事業部燃料サイクル技術部（以下、燃料サイクル技術部と云う。）

燃料サイクル技術部長は、次の責任及び権限を有する。

- (1) 輸送容器の設計及び許認可取得
- (2) 輸送容器の設計に関する文書の作成
- (3) 輸送容器の試作、評価及び品質確認試験の管理

B.6 エンジニアリング事業部炉心・安全技術部（以下、炉心・安全技術部と云う。）

炉心・安全技術部長は、次の責任及び権限を有する。

(1) 輸送容器の臨界・遮蔽解析

B.7 熊取事業所環境安全部（以下、熊取環境安全部と云う。）

熊取環境安全部長は、次の責任及び権限を有する。

(1) 核燃料物質の計量管理に関する計画立案及び実施

(2) 計量管理規定及び関連基準類の策定及び遵守状況の管理

B.8 熊取事業所設備管理部（以下、熊取設備管理部と云う。）

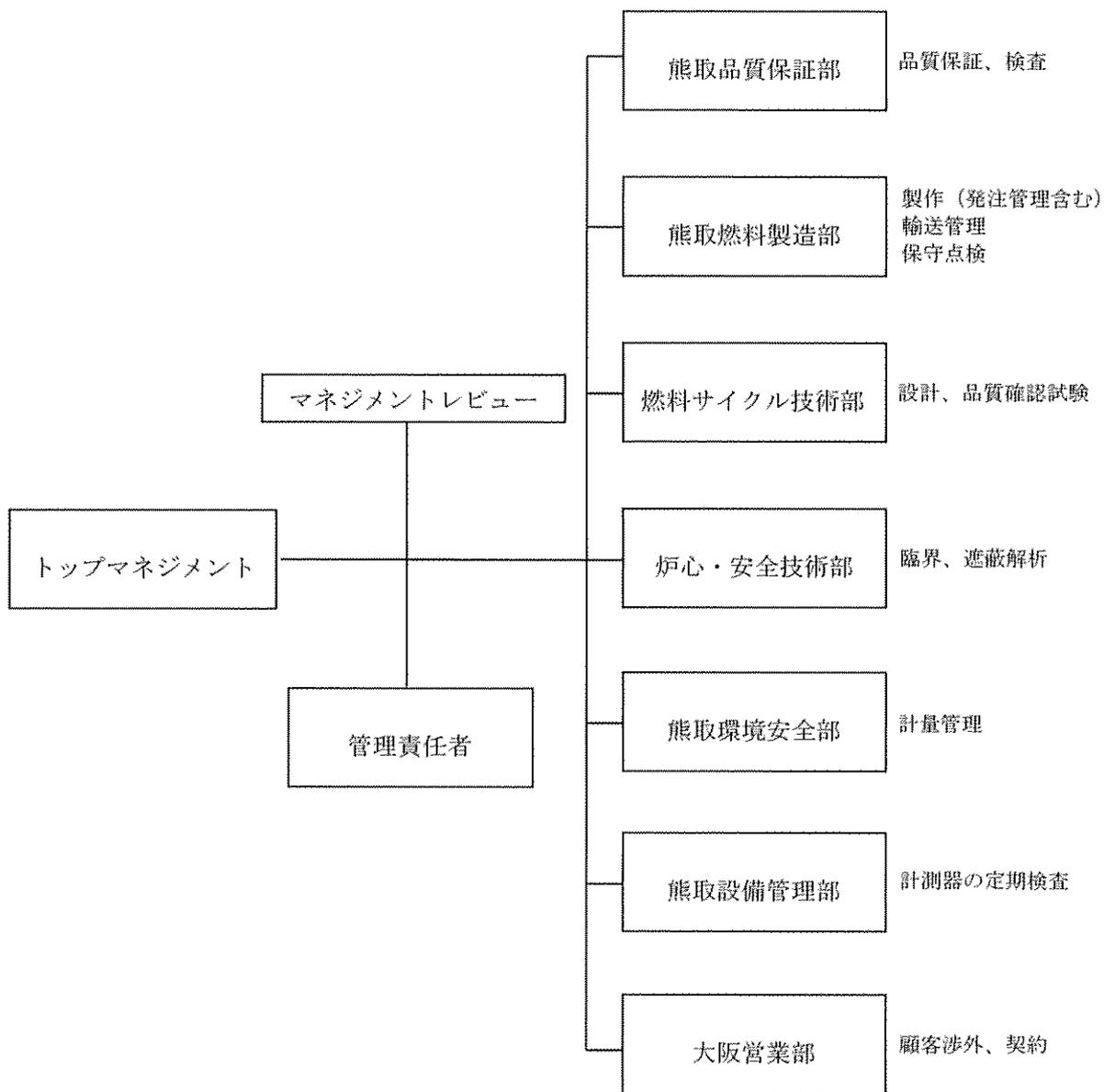
熊取設備管理部長は、次の責任及び権限を有する。

(1) 計測器の定期検査

B.9 大阪営業部

大阪営業部長は、次の責任及び権限を有する。

(1) 顧客への渉外、契約の実施



(イ) B-第1図 原子燃料工業(株) 輸送容器の設計及び製作に係る組織

(イ)－C 教育・訓練

熊取品質保証部長、熊取燃料製造部長、燃料サイクル技術部長、炉心・安全技術部長、熊取環境安全部長、熊取設備管理部長及び大阪営業部長は輸送容器の製作に関連する教育、訓練、技能及び経験を判断の根拠として力量がある要員に従事させる。そのために以下の事項を実施する。

- (1) 輸送容器の製作に係る品質に影響する活動に従事する要員に必要な力量を明確にする。
- (2) 必要な力量がもてるように教育・訓練し、又は他の処置をとる。
- (3) 教育・訓練又は他の処置の有効性を評価する。
- (4) 部内の要員が、自らの活動の持つ意味と重要性を認識し、品質目標の達成に向けて自らどのように貢献できるかを認識することを確実にする。
- (5) 教育・訓練、技能及び経験について該当する記録を維持する。

(イ)-D 設計管理

燃料サイクル技術部長は、設計が設計要求事項に適合することを確実にするため、次の事項を実施する。

D.1 設計管理

- (1) 顧客の要求事項、法令の技術上の基準、性能・機能上の要求事項を明確にし、設計を実施する。設計の一部を外部に委託する場合は、顧客の要求事項、法令の技術上の基準、性能・機能上の要求事項等を踏まえた設計要求事項を発注仕様書で明確にし、委託先に提示する。
- (2) 新設計・新技術又は特殊材料を採用する場合には、当社の設計要求事項を設計者に十分理解させるため、必要に応じ設計者及び材料メーカーとの間で、安全性と仕様との関連、仕様決定の背景等についての情報交換を行う。
- (3) 設計文書（図面、計算書、解析書等）に設計要求事項が適切に反映されていることを審査し、承認する。

D.2 設計検証

上記の設計結果に基づき、新設計・新技術又は特殊材料を採用する場合は、必要に応じ実証試験、代替計算等により設計検証を行う。

D.3 設計変更

設計仕様を変更する場合、変更の内容を明確に文書化し、審査し、承認する。設計仕様の変更に伴い、設計者に設計変更をさせる場合、又は設計の委託先に設計を変更させる場合、設計者又は設計の委託先が作成する設計文書（図面、計算書、解析書等）に要求事項が適切に反映されていることを審査し、承認する。また、関係する各部へ設計変更に関する内容を文書により伝達する。

D.4 設計委託先の評価

輸送容器の設計を外部に委託する場合は、委託先が適切な人員、技術能力及び品質マネジメントシステムを有していることを確認する。なお、品質マネジメントシステムについては、熊取品質保証部長が燃料サイクル技術部長の依頼を受け、委託先が適切な品質マネジメントシステムを有していることを資格審査で確認する。

(イ)－E 輸送容器の製造発注

輸送容器が顧客の要求事項、法令の技術上の基準、設計承認申請書の設計仕様、容器承認申請書の製作方法等の調達要求事項に適合することを確実にするため、次の事項を実施する。

E.1 容器製造者の評価

熊取燃料製造部長は、容器製造者の選定に際して、容器製造者の技術能力、組織、品質保証体制等を評価する。評価に当たっては、必要に応じて次の事項を考慮する。

- (1) 輸送容器の製造に関する技術・要員及び製造設備
- (2) 容器製造者の品質方針、品質計画及びそれらの実施状況
- (3) 輸送容器又は類似のものに関する供給実績
- (4) 輸送容器又は類似のものに関する使用実績及び品質に関する記録
- (5) 試作品、サンプル等の評価

E.2 容器製造者への品質マネジメントシステムの要求事項

熊取燃料製造部長は、輸送容器の製造発注に当たって、容器製造者に対して、適切な品質を確保させるために、次の事項を発注仕様書で明確に指示し、実施させる。

- (1) 容器製造者の業務範囲
- (2) 設計、製作、検査、適用法令等の技術的要求事項
- (3) 品質計画の提出に関する事項
- (4) 品質監査、検査等のための容器製造者への立ち入りに関する事項
- (5) 文書の提出、並びに記録の提出及び保管に関する事項
- (6) 不適合の処置に関する事項
- (7) 調達要求事項の適用を供給者まで及ぼすための事項

さらに、次の事項についても具体的に発注仕様書に明記する。

- ① ISO 9001 等に適合する品質管理が行われること。
- ② 当社及び規制当局が、容器製造者及び容器製造者の供給者等において、輸送容器の製造時の検査や品質管理状況の確認を行うことができること。
- ③ 当社が容器製造者の供給者の選定基準について審査し、承認できるように措置すること。
- ④ 輸送容器の製造に携わる事業者間の責任関係を契約等により明確にするための措置を講じること。また、当社が容器製造者の供給者の選定状況を確認できるよう措置すること。
- ⑤ 当社が示す安全上重要な材料仕様値等について、容器製造者及び容器製造者の供給者にその数値の意味と重要性を十分理解させるための措置を講じること。
- ⑥ 輸送容器の製造に当たって、安全上重要度の高い特殊材料を使用する場合は、あらかじめ製造に係わる施工・分析・検査方法について、輸送容器の製造に携わる各事業者間における情報交換や技術的検討が十分行われるための措置を講じること。
- ⑦ 輸送容器の製造に携わる複数の事業者間にまたがる工程では、作業指示や納期などの

取決めを明確にし、緊密な連携を図るための措置を講じること。

- ⑧ 不適合品が発生し手直し等により使用する場合は、熊取燃料製造部長に文書で通知し、取扱いの指示を受けるように措置すること。
- ⑨ 容器製造者の製造工程において重要な変更があった場合は、熊取燃料製造部長に速やかに報告し、承認を受けるように措置すること。
- ⑩ 容器製造者がその供給者に対して、次の事項を行うよう措置すること。
 - (a) E.1 項に準じて、下請負を行う能力の評価を行うこと。
 - (b) E.2 項(1)～(7)に準じて、当社が容器製造者に要求した事項をその供給者に指示し、実施させること。
 - (c) E.3 項に準じて、容器製造者がその供給者に対して、品質監査及び検査により検証すること。

ただし、容器製造者の供給者が、次の場合は、この限りではない。

- (i) 容器承認申請書の検査項目と関係のないと認められる下請負である場合。
- (ii) 容器製造者等が立会検査を行うことにより、直接管理する場合。
- (iii) JIS 等の公的規格や公的資格制度により製造が行われる場合。
- (iv) 検査の確認項目が簡易なものや汎用品であって、受入時の検取で十分と認められる場合。

E.3 輸送容器の製造の検証

輸送容器が調達要求事項に適合していることを検証するために、次の事項を実施する。

- (1) 熊取品質保証部長は、品質監査に当たって、品質監査計画及び品質監査要領を策定し、これに従い実施する。また、熊取燃料製造部長は、輸送容器の検査に当たって、検査計画及び検査要領を策定する。熊取品質保証部長は、策定された検査要領に基づき輸送容器の検査を実施する。
- (2) 熊取品質保証部長は、容器製造者の品質監査を行うとともに、必要に応じ容器製造者の供給者に対し品質監査を行う。
- (3) 熊取燃料製造部長は、輸送容器の検査に当たって、安全上の重要性などを考慮しつつ、公的規格及び公的資格制度の有無、容器製造者及びその供給者の品質管理状況等を勘案し、立会確認又は記録確認等の確認要領を策定する。

(イ)－F 取扱い及び保守

熊取燃料製造部長は、核燃料輸送物に関する法令の技術上の基準、設計承認申請書の設計仕様を維持するため、以下のとおり、安全解析書(ハ)章の記載に則した要領を策定し、取扱い、保守を行う。

F.1 取扱い

核燃料輸送物の取扱い作業に関する手順を策定するとともに、関係する各部に周知徹底し、輸送中の輸送物の安全性を確保する。

- ・“梱包作業手順”
- ・“受入作業手順”
- ・“納入作業手順”

F.2 発送前検査

核燃料輸送物の発送前検査の要領を策定するとともに、関係する各部に周知徹底し、輸送中の核燃料輸送物の安全性を確保する。

- (1) 発送前検査を実施するに当たり、“発送前検査標準”や検査記録様式として具体化する。
- (2) 発送前検査を実施した結果は、輸送容器の種類ごとに定めた検査記録様式に従い必要な事項を記入して保管する。

F.3 保管及び保守点検

輸送容器の保管及び保守点検について、輸送容器の“管理要領”を策定、実施し、継続的に輸送容器の性能維持を図る。

F.4 定期自主検査

輸送容器の定期自主検査の要領を策定するとともに、関係する組織に周知徹底し、性能維持を確認する。

- (1) 承認容器は、安全解析書に記載の内容に則り必要な定期自主検査項目について 1 年に 1 回以上（年間の使用回数が 10 回を超える場合には使用回数 10 回ごとに 1 回以上）実施する。
- (2) 輸送容器の定期自主検査は、有効期限以内に確実に実施するように、輸送容器の運用状況等を考慮して事前に実施予定を立案する。
- (3) 定期自主検査を実施するに当たり、“定期自主検査標準”や検査記録様式として具体化する。
- (4) 定期自主検査を実施した結果は、輸送容器の種類ごとに定めた検査記録様式に従い必要な事項を記入して保管する。

F.5 取扱い及び保守の委託

F.1 項～F.4 項の取扱い及び保守に関しては、ペレット製造委託先等に委託する場合がある。熊取燃料製造部長はそれら委託先に対して、取扱い及び保守に必要な要求仕様を明確にするとともに、委託先で実施された取扱い及び保守に関する記録を確認し、維持する。

(イ)－G 測定、分析及び改善

G.1 内部品質監査

熊取品質保証部長は、品質マネジメントシステムが効果的に実施され、維持されているかを明確にするため、定期的に内部品質監査を実施する。監査の計画及び実施について、手順書で規定する。監査員は、自らの仕事は監査しない。被監査領域の責任者は、発見された不適合及びその原因を除去するために遅滞なく処置する。

G.2 不適合品の管理

熊取燃料製造部長は、不適合品を識別し管理する。不適合品の処理に関する管理及びそれに関連する責任及び権限を手順書に規定する。

G.3 是正処置及び予防処置

(1) 是正処置

当社は、再発防止のため、不適合の原因を除去する処置をとる。不適合の内容確認、原因の特定、再発防止処置、処置の結果の記録等に関する要求事項を規定する手順書を定める。

(2) 予防処置

当社は、起こりうる不適合が発生することを防止するため、その原因を除去する処置を決める。起こりうる不適合及びその原因の特定、発生防止処置、処置の結果の記録等に関する要求事項を、手順書に定める。