

核燃料輸送物設計承認申請書の一部補正について

熊原第 21-004 号
令和 3 年 2 月 15 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
取締役社長 北川 健一

令和 2 年 7 月 22 日付熊原第 20-017 号をもって申請した核燃料輸送物設計承認申請書について、下記のとおり一部補正します。

記

核燃料輸送物設計承認申請書を次のとおり変更し、別紙を添付のとおり変更する。

1. 核燃料輸送物の名称

Traveller XL 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

幅 : 約 69cm

長さ : 約 574cm

高さ : 約 100cm

(2) 輸送容器の重量

1,476kg 以下

(3) 核燃料輸送物の総重量

kg 以下

(4) 輸送容器の概略を示す図

図 1 のとおり

詳細形状は、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計承認申請書（令和 2 年 7 月 22 日付熊原第 20-017 号（令和 3 年 2 月 15 日付け熊原第 21-004 で一部補正）に係る別紙 1 の図（イ）-1 から図（イ）-10 までに示されている。

(5) 輸送容器の主要材料

- ・ 本体 : ステンレス鋼、発泡ポリウレタン
- ・ クラムシェル : アルミニウム合金
- ・ 中性子吸収材 : BORAL®
- ・ 中性子減速材 : 超高分子量ポリエチレン
- ・ ボルト、ヒンジ : ステンレス鋼

3. 核燃料輸送物の種類

A 型輸送物及び核分裂性物質に係る核燃料輸送物

4. 収納する核燃料物質等の種類、性状、重量及び放射能の量

表 1 のとおり

5. 輸送制限個数

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

6. 臨界安全評価における浸水の領域に関する事項

一般の試験条件下においては輸送容器への浸水を考慮し、燃料棒への浸水は考慮しない。
特別の試験条件下においては輸送容器及び燃料棒への浸水について考慮する。

7. 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。

8. BM 型輸送物にあっては、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

9. 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

本輸送容器の保守及び核燃料輸送物の取扱いについては、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計承認申請書（令和 2 年 7 月 22 日付熊原第 20-017 号（令和 3 年 2 月 15 日付け熊原第 21-004 で一部補正））に係る別紙のとおり。

10. その他特記事項

(1) 運搬中に予想される周囲の温度の範囲

-40℃から 38℃まで

(2) 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、輸送容器は収納物を収納、保持するクラムシエルの側面に中性子吸収材を設けるとともに、特別の試験条件においた場合においても局所的な損傷を抑え、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。

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

輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）については、本核燃料輸送物の核燃料輸送物設計承認申請書（令和 2 年 7 月 22 日付熊原第 20-017 号（令和 3 年 2 月 15 日付け熊原第 21-004 で一部補正））に係る別紙のとおり。

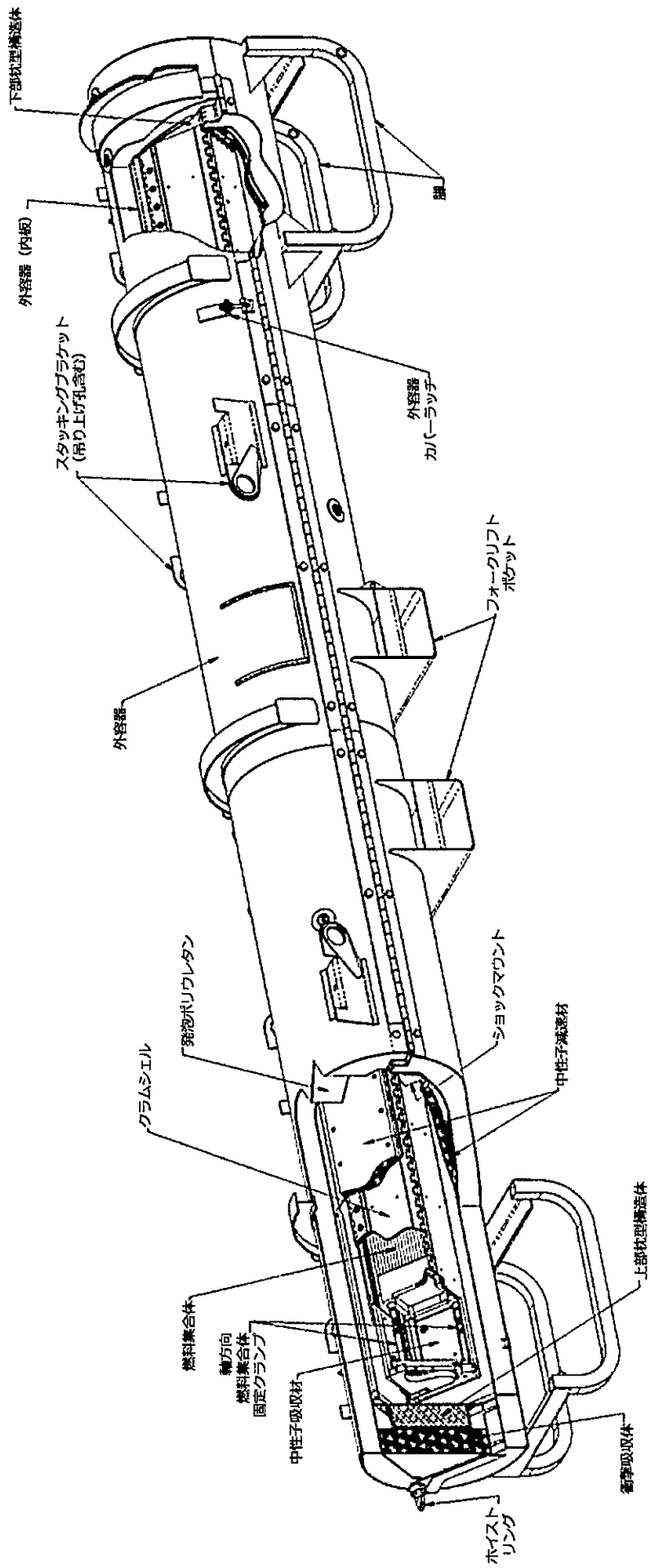


図 1 Traveller XL 型輸送容器の概略図

表 1 収納する核燃料物質等の種類、性状、重量及び放射能の量

形式		新燃料集合体			
		14×14 型	15×15 型	17×17 型	
				タイプ 64	タイプ 57
種類		新燃料集合体 (二酸化ウラン燃料)			
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)			
収納体数		1 体			
重量	収納物重量				
	集合体重量				
	UO ₂ 量				
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	□ wt%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				
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					

添付

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

Traveller XL 型 輸送物安全解析書

令和 3 年 2 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)-19
(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-5
A.3 材料の機械的性質	(ロ)A-6
A.4 輸送物の要件	(ロ)A-9
A.4.1 化学的及び電気的反応	(ロ)A-9
A.4.2 低温強度	(ロ)A-10
A.4.3 密装置	(ロ)A-17
A.4.4 吊上装置	(ロ)A-17
A.4.5 固縛装置	(ロ)A-22
A.4.6 圧力	(ロ)A-22
A.4.7 振動	(ロ)A-24
A.5 一般の試験条件	(ロ)A-26
A.5.1 熱的試験	(ロ)A-26
A.5.1.1 温度及び圧力の要約	(ロ)A-26
A.5.1.2 熱膨張	(ロ)A-26
A.5.1.3 応力計算	(ロ)A-27
A.5.1.4 許容応力との比較	(ロ)A-28
A.5.2 水噴霧	(ロ)A-28
A.5.3 自由落下	(ロ)A-29
(a) 解析モデル	(ロ)A-29
(b) 原型試験	(ロ)A-29
(c) モデル試験	(ロ)A-30
A.5.4 積み重ね試験	(ロ)A-32
A.5.5 貫通	(ロ)A-39
A.5.6 角又は縁落下	(ロ)A-39

A.5.7 結果の要約及びその評価	(ロ)A-39
A.6 特別の試験条件	(ロ)A-40
A.7 強化浸漬試験	(ロ)A-40
A.8 放射性収納物	(ロ)A-40
A.9 核分裂性輸送物	(ロ)A-42
A.9.1 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件	(ロ)A-42
A.9.2 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件	(ロ)A-44
A.10 構造解析まとめ	(ロ)A-61
(ロ)A 付属資料 1 落下試験結果報告書	
(ロ)A 付属資料 2 落下試験における試験体重量に係る検討	
(ロ)A 付属資料 3 垂直落下時における燃料健全性に係る検討	
(ロ)A 付属資料 4 水平落下時における燃料健全性に係る検討	
(ロ)A 付属資料 5 9m 垂直落下時における加速度に係る検討	
(ロ)A 付属資料 6 固有振動数導出に係る補足説明資料	
(ロ)B 熱解析	(ロ)B-1
B.1 概 要	(ロ)B-1
B.2 材料の熱的性質	(ロ)B-2
B.3 構成要素の仕様	(ロ)B-2
B.4 一般の試験条件	(ロ)B-4
B.4.1 熱解析モデル	(ロ)B-4
B.4.1.1 解析モデル	(ロ)B-4
B.4.1.2 試験モデル	(ロ)B-4
B.4.2 最高温度	(ロ)B-4
B.4.3 最低温度	(ロ)B-7
B.4.4 最大内圧	(ロ)B-7
B.4.5 最大熱応力	(ロ)B-7
B.4.6 結果の要約及びその評価	(ロ)B-8
B.5 特別の試験条件	(ロ)B-9
B.5.1 熱解析モデル	(ロ)B-10
B.5.1.1 解析モデル	(ロ)B-10
B.5.1.2 試験モデル	(ロ)B-10
B.5.2 輸送物の評価条件	(ロ)B-10
B.5.3 輸送物温度	(ロ)B-10
B.5.4 最大内圧	(ロ)B-16
B.5.5 最大熱応力	(ロ)B-19
B.5.6 結果の要約及びその評価	(ロ)B-20
(ロ)B 付属資料 1 フルスケールモデル耐火試験結果	

(ロ)ー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-2
C.2.3 密封装置のガスケット及び溶接部	(ロ)C-2
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-3
C.3.2 密封装置の加圧	(ロ)C-3
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.5 結果の要約及びその評価	(ロ)C-3
(ロ)ーD 遮蔽解析	(ロ)D-1
D.1 概 要	(ロ)D-1
D.2 線源仕様	(ロ)D-3
D.2.1 ガンマ線源	(ロ)D-4
D.2.2 中性子源	(ロ)D-5
D.3 モデル仕様	(ロ)D-6
D.3.1 解析モデル	(ロ)D-6
D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度	(ロ)D-10
D.4 遮蔽評価	(ロ)D-11
D.5 結果の要約及びその評価	(ロ)D-11
(ロ)D 付属資料 1 最大線量当量率を与える評価点の検討	
(ロ)D 参考資料 1 ORIGEN 2.2 の概要	
(ロ)D 参考資料 2 QAD-CGGP2R の概要	
(ロ)ーE 臨界解析	(ロ)E-1
E.1 概 要	(ロ)E-1
E.2 解析対象	(ロ)E-9
E.2.1 収 納 物	(ロ)E-9
E.2.2 輸送容器	(ロ)E-11
E.2.3 中性子吸収材	(ロ)E-11
E.3 モデル仕様	(ロ)E-12
E.3.1 解析モデル	(ロ)E-12
E.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度	(ロ)E-29
E.4 未臨界評価	(ロ)E-30
E.4.1 計算条件	(ロ)E-30

E.4.2 輸送物への水の侵入等	(ロ)E-31
E.4.3 計算方法	(ロ)E-33
E.4.4 計算結果	(ロ)E-33
E.5 ベンチマーク試験	(ロ)E-34
E.6 結果の要約及びその評価	(ロ)E-35
(ロ)E 付属資料 1 サーベイ計算の結果	
(ロ)-F 規則及び告示に対する適合性の評価	(ロ)F-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 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-12
A.3 取出し方法	(ハ)A-13
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-2
B.7 吊上検査	(ハ)B-2
B.8 作動確認検査	(ハ)B-2
B.9 補助系の保守	(ハ)B-2
B.10 密封装置の弁、ガスケット等の保守	(ハ)B-2
B.11 輸送容器の保管	(ハ)B-2
B.12 記録の保管	(ハ)B-2
B.13 その他	(ハ)B-2
(ニ)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項	(ニ)-1

(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) 用燃料集合体の国内輸送及び国際輸送に使用する事を目的とする。

(2) 輸送容器の名称 Traveller XL 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

・ 輸送容器の総重量 1,476 kg 以下

・ 核燃料輸送物の総重量 kg 以下

(2) 構成材料

主要構成材料は次の通りである。

本輸送容器は、外容器及び保護容器 (クラムシエル) から構成される。外容器の主要構造材はステンレス鋼製の外板及び内板と発泡ポリウレタンである。クラムシエルの主要構造材はアルミニウム合金である。各構造材料の詳細を表(イ)-1に示す。

(3) 中性子吸収材

中性子吸収材は、クラムシェル内に配した BORAL®が該当する。BORAL®は 3 層構造からなる複合材であり、外側 2 層はアルミニウム合金のシート、中央層はアルミニウム粉末と B₄C 粉末を熱間圧延により成形したサーメットである。

(4) 中性子減速材

中性子減速材は、外容器内に配した超高分子量ポリエチレンが該当する。

(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)- 8 に示す。

(a) 概 要

本輸送物の概略図を図(イ)- 1 に示す。本輸送容器は、外容器及びクラムシェルと呼ばれる保護容器から構成される。外容器は、ステンレス鋼製の二重壁構造であり、落下時の衝撃及び火災時の熱の流入を緩和するため二重壁内に発泡ポリウレタンが充填されている。また、外容器の両端部には、落下時の衝撃を吸収するため衝撃吸収体及び枕型構造体が備わっている。外容器の上側ケースと下側ケースについては、ヒンジ及びボルトが側面両側を固定する構造となっている。

クラムシェルは、アルミニウム合金製板からなる箱型構造となっており、収納物の通常に取り扱い時の損傷を防止するとともに、輸送事故時の際の収納物の変形を制限する。クラムシェルは、ヒンジ及びラッチによって扉を固定する構造となっている。また、中性子吸収材である BORAL®製板は、クラムシェル内側の全面に配置している。

(b) 構 造

①外容器 (図(イ)- 2～図(イ)- 6 参照)

外容器は、収納物への衝撃と熱から保護するための構造体であり、輸送時の吊り上げ及び積み重ね機能も有している。外容器は、上側ケースと下側ケースからなる円筒形状である。外容器は、厚さ 2.7mm ステンレス鋼製の外板、10pcf¹の発泡ポリウレタン、及び厚さ 2.7mm ステンレス鋼製の内板で構成される。ステンレス鋼板は、発泡ポリウレタンの強度

¹ ヤードポンド法表記の密度の単位、1pcf = 16.02kg/m³

を補強するとともに、保護・被覆する。上側ケースと下側ケースはヒンジ及びボルトによって固定される構造である。

外容器は、両端部に衝撃吸収体及び枕型構造体を備えている。衝撃吸収体は、ステンレス鋼製のカバーで被膜された 20pcf の発泡ポリウレタンからなり、枕型構造体は、ステンレス鋼製のカバーで被膜された 6pcf の発泡ポリウレタンからなっている。

外容器の側面内側には超高分子量ポリエチレン製のブロックが取り付けられており、中性子減速材の機能とともに、水平、傾斜落下時にクラムシェルと収納物の衝撃を吸収する。外容器の下側ケースの内側には、クラムシェルを固定し衝撃や振動を吸収するためのショックマウントが取り付けられている。

②クラムシェル (図(イ)-7、図(イ)-8 参照)

クラムシェルは、収納物を保護するための構造体である。収納物の装荷直後に閉じられ、通常の取り扱い時の損傷を防止するとともに、輸送事故時の際の収納物の変形を制限する。

クラムシェルは、アルミニウム合金製の L 字型メインフレーム、2 枚のメイン扉、上端の上部ドア、ボトムプレート及びトッププレートから構成される。L 字型メインフレームと 2 枚のメイン扉は、ヒンジで接続されている。2 枚のメイン扉同士は図(イ)-9 に示す 11 箇所のラッチ機構とボルトで締められる。下部ノズル端部については、ボトムプレートと L 字型メインフレームがボルトで固定されている。

上端部については、異なる燃料タイプに対応するため、リムーバブルトッププレート (RTP) と固定トッププレート (FTP) の 2 つの設計が存在する。図(イ)-7 に示す RTP は、トッププレートと上部ドアは固定されておらず、トッププレートの全周縁に設けられた溝と、L 字型メインフレーム及び上部ドアの上部が噛み合う構造となっている。図(イ)-8 に示す FTP は、トッププレートと上部ドアがボルトで固定されている。なお、RTP と FTP はともに、トッププレート、L 字型メインフレーム、上部ドアは、ヒンジ及びヒンジピンで締められる。また、RTP には後述するスタッドが直接取り付けられるようにネジ穴が空いているが、燃料集合体設計 (上部ノズル寸法) に対応するため、ネジ穴の位置が異なる設計が存在する。

L 字型メインフレーム及びボトムプレートには、図(イ)-7 に示すように通常の取り扱いや輸送条件において、収納物への影響をやわらげ、損傷を防ぐためにラバーコルクパッドが取り付けられている。

収納物である燃料集合体は、クラムシェル内で軸方向及び横方向に拘束される。軸方向については、図(イ)-10 に示すスタッドにより上部側から拘束される。なお、スタッドと燃料集合体の接合部はラバーコルクからなる。横方向については、メイン扉に取り付けられた軸

方向位置が調整可能なグリッドパッドと呼ばれるバネ付きパッドによって、輸送時の移動が防止されている。

なお、その他収納物として、図(イ)- 11 に示すように、適切な長さのアルミニウム合金製の軸方向スペーサーをボトムプレートに配置することで、様々な長さの燃料集合体を収納することが可能となる。なお、軸方向スペーサーの上部には燃料集合体との緩衝材の役目をするゴム製パッドを置く。

③中性子吸収材

中性子吸収材は BORAL®製板であり、クラムシエルの各側面の内側表面全長に沿ってネジ止めされている。

④スタッキングブラケット及び吊り上げ孔

スタッキングブラケットはステンレス鋼製板を成形したもので、外容器の上側ケースに 8箇所存在する。なお、スタッキングブラケットはクレーン用の吊り上げ孔も一体化した構造となっている。

⑤脚及びフォークリフトポケット

脚はステンレス鋼製板を成形したもので、外容器の下側ケースの両端 2箇所存在する。また、フォークリフト用のポケットはステンレス鋼製板を成形したもので、外容器の下側ケースの中央部に 2箇所存在する。

⑥可融栓

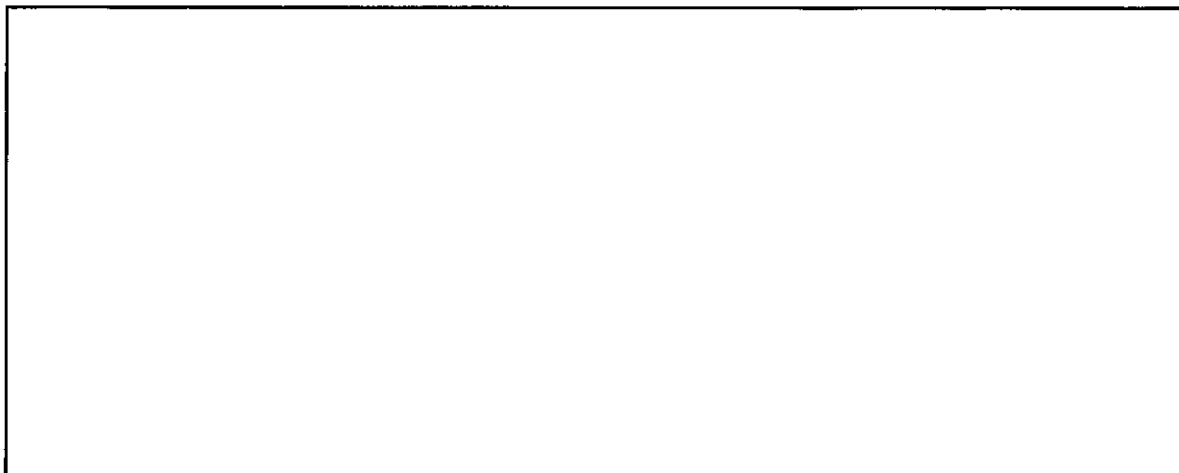
Traveller XL 型輸送容器の外容器には、火災が発生したときに溶融するアセテート製の可融栓が組み込まれており、発泡ポリウレタンから発生する分解物を外気に放出できるようにになっている。

⑦補助部材

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クラムシエルの長手方向両端付近に、加速度計を取付け、輸送容器の取扱い及び輸送中の燃料集合体への衝撃を監視することも可能である。

(7) 溶接方法



(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フォークリフトポケット、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脚が主な突出物である。

(12) 吊上装置

輸送容器の吊上装置は、スタッキングブラケットである。

上側ケースの8箇所の位置にスタッキングブラケットが取付けられており、このスタッキングブラケットに設けられた吊り上げ孔により輸送容器を吊り上げる。

(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

輸送物の密封境界は燃料棒が該当するが、燃料棒には圧力逃がし弁に相当するものはない。

(15) ガasket

外容器の上側ケースと下側ケースのフランジ面にはファイバーガラスもしくはシリコンゴム製のガasketを配しており、容器内への雨や水の侵入を防いでいる。なお、ガasketは不連続になっており、外容器は密封されない。

(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 又はジルコニウム合金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、一般の試験条件においては容器内に浸水するものとして評価し、特別の試験条件下においては燃料棒まで浸水するものとして評価している。

(18) 密封装置

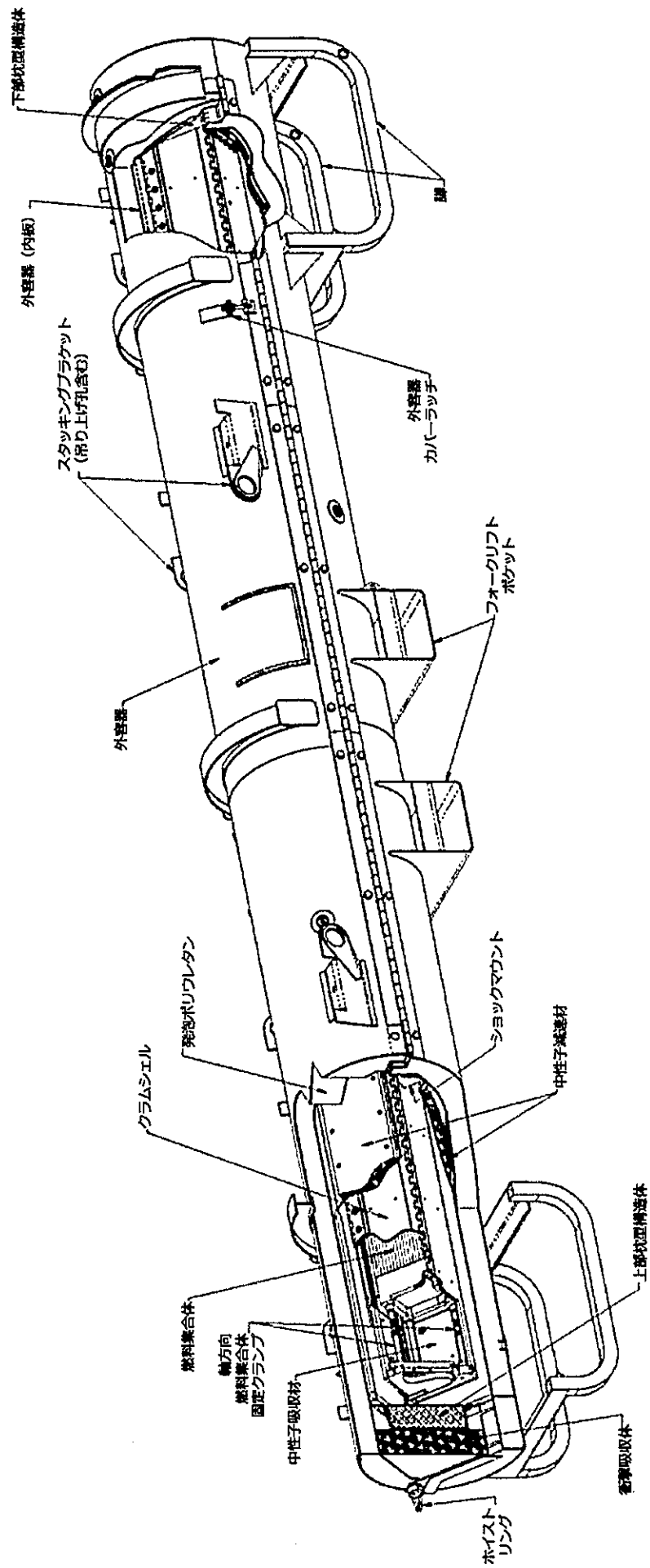
輸送物の密封境界としては、燃料被覆管が該当し、本輸送容器には該当する装置はない。ただし、輸送容器は上側ケース及び下側ケースのフランジ面でガasketを介してヒンジ及びボルトによって締め付けることにより雨、埃等の侵入を防いでいる。

表(イ)-1 主要構造材料 (1/2)

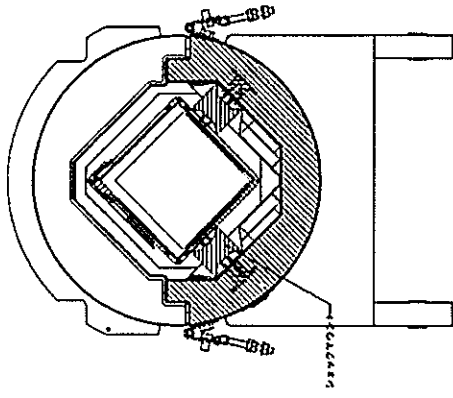
区分	主要構成要素	材質	適用規格	備考
外 容 器	外板	ステンレス鋼	ASTM A240 304SUS	t2.7
	内板	ステンレス鋼	ASTM A240 304SUS	t2.7
	発泡ポリウレタン	発泡ポリウレタン	—	密度は 10pcf
	中性子減速材	超高分子量ポリエチレン	—	密度は 0.932-0.945g/cm ³
	衝撃吸収体カバナー	ステンレス鋼	ASTM A240 304SUS	
	衝撃吸収体	発泡ポリウレタン	—	密度は 20pcf
	枕型構造体カバナー	ステンレス鋼	ASTM A240 304SUS	
	枕型構造体	発泡ポリウレタン	—	密度は 6pcf
	ショックマウント	天然ゴム	—	
	ヒンジ	ステンレス鋼	SUS304	
	ボルト	ステンレス鋼	ASTM A193 Class1 Grade B8	3/4-10 X 1" LONG
	脚	ステンレス鋼	ASTM A240 304SUS	50.8×50.8×3.0t
	スタッキングブ래ケット	ステンレス鋼	ASTM A240 304SUS	
	補強リング	ステンレス鋼	ASTM A240/A276 304SUS	
	可融栓	ステンレス鋼	ASTM A240 304SUS	
	可融栓(溶融部)	アセテート繊維	—	
	ガスケット	シリコンゴム もしくは ファイバーガラス	—	
	断熱材	耐火繊維フェルト	—	
	ホイストリング	クロムモリブデン鋼	—	

表(イ)-1 主要構造材料 (2/2)

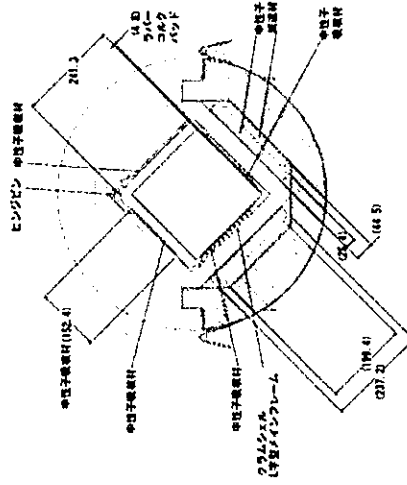
区分	主要構成要素	材質	適用規格	備考
ク ラ ム シ ェ ル	L字型メインフレーム	アルミニウム合金	ASTM B209/B221 6005-T5	t7.3
	メイン扉	アルミニウム合金	ASTM B209/B221 6005-T5	t7.3
	上部ドア	アルミニウム合金	ASTM B209/B221 6005-T5	t7.3
	トッププレート	アルミニウム合金	ASTM B209/B221 6061-T6	t25.4
	ボトムプレート	アルミニウム合金	ASTM B209/B221 6061-T6	t25.4
	ラッチハンドル	アルミニウム合金	ASTM B209/B221 6061-T6	
	ラッチキーパー	ステンレス鋼	SUS304	
	ラッチボルト	ステンレス鋼	SUS304	
	中性子吸収材	BORAL®	—	外側2層はアルミニウム合金のシート、中央層はアルミニウム粉末とB ₄ C粉末から成形したサーメット
	ヒンジ	アルミニウム合金	ASTM B209/B221 6005	
	ヒンジピン	ステンレス鋼	SUS304	
	グリッドパッド		—	
	ラバーコルクパッド	ラバーコルク	—	
	クランプ、スタッド	ステンレス鋼	SUS300系	
	スタッド (接触部)	ラバーコルク	—	



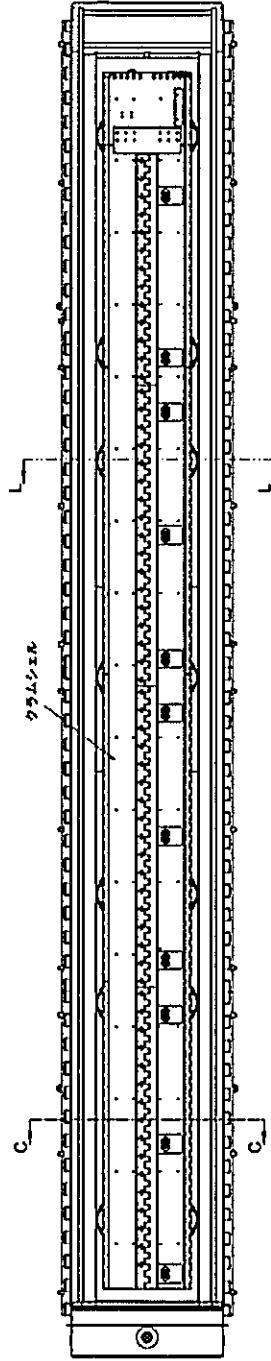
図(イ)-1 Traveller XL 型輸送物の概略図



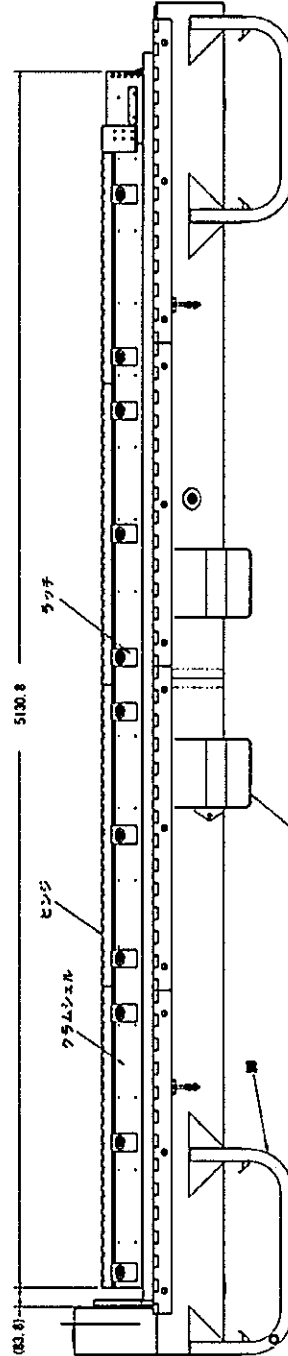
(断面図 L-L)



(断面図 C-C)

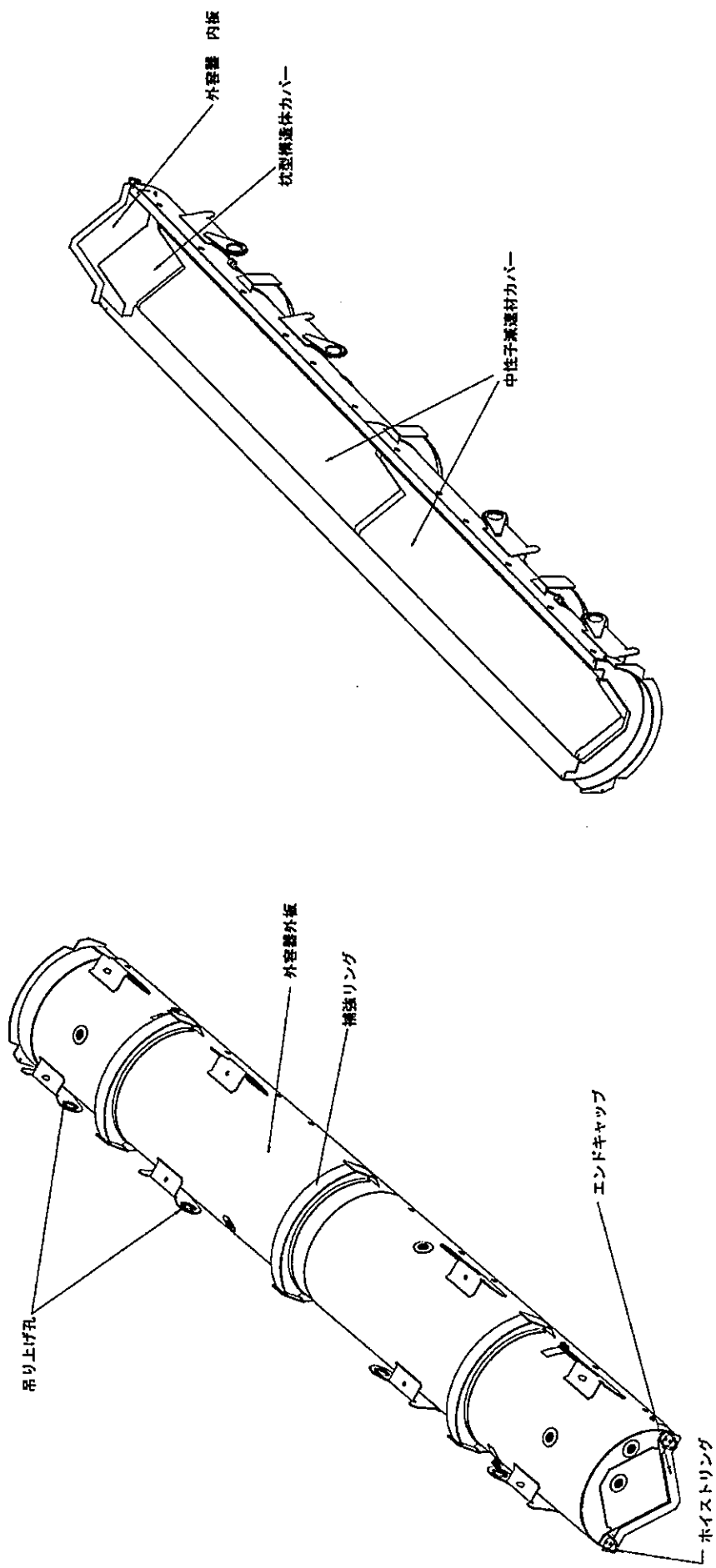


(平面図)

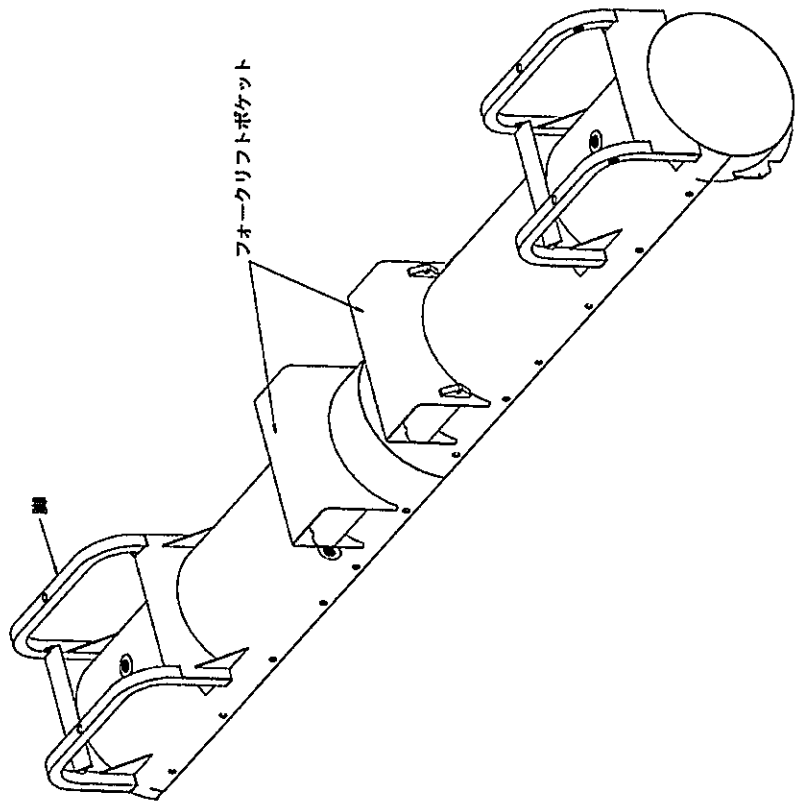


(側面図)

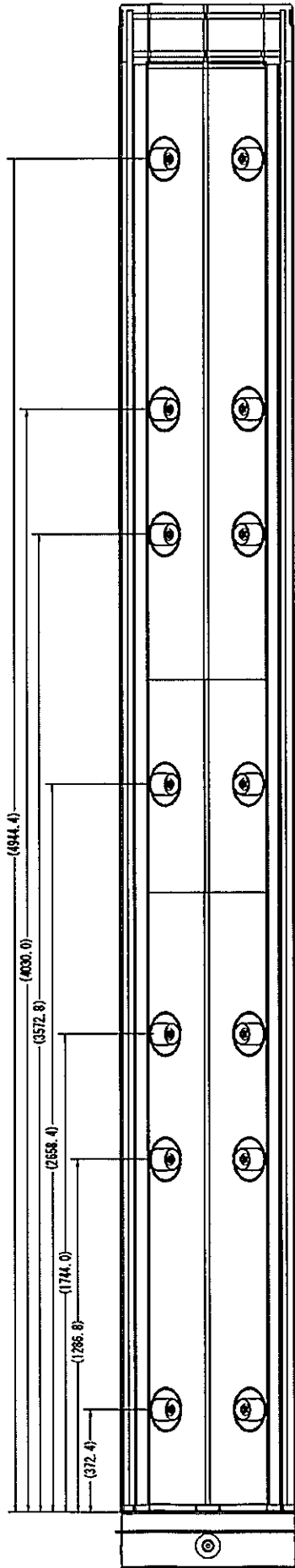
図(イ)-3 Traveller XL 型輸送物全体図 (上側ケース開)



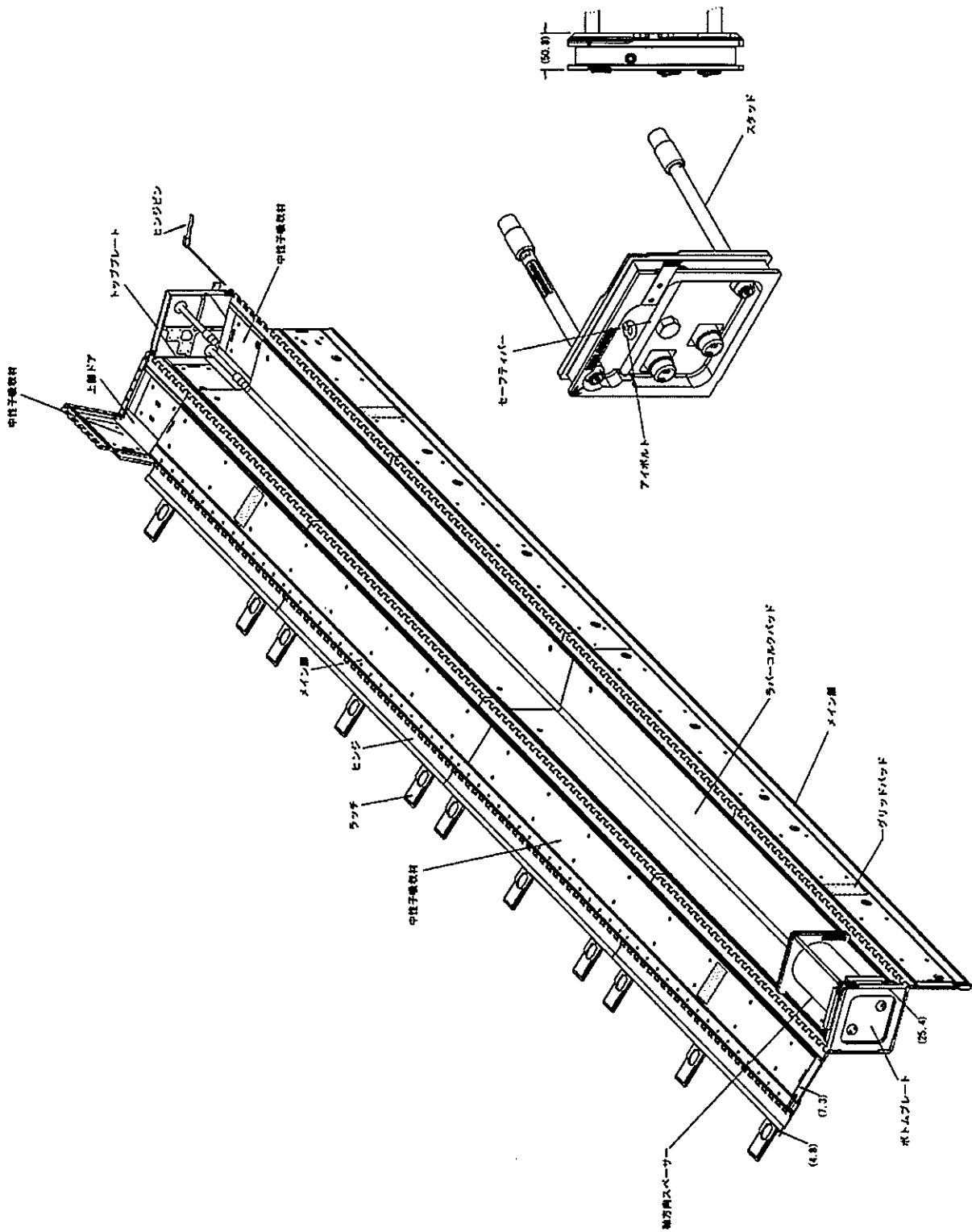
図(イ)-4 Traveller XL 型輸送物 上側ケース



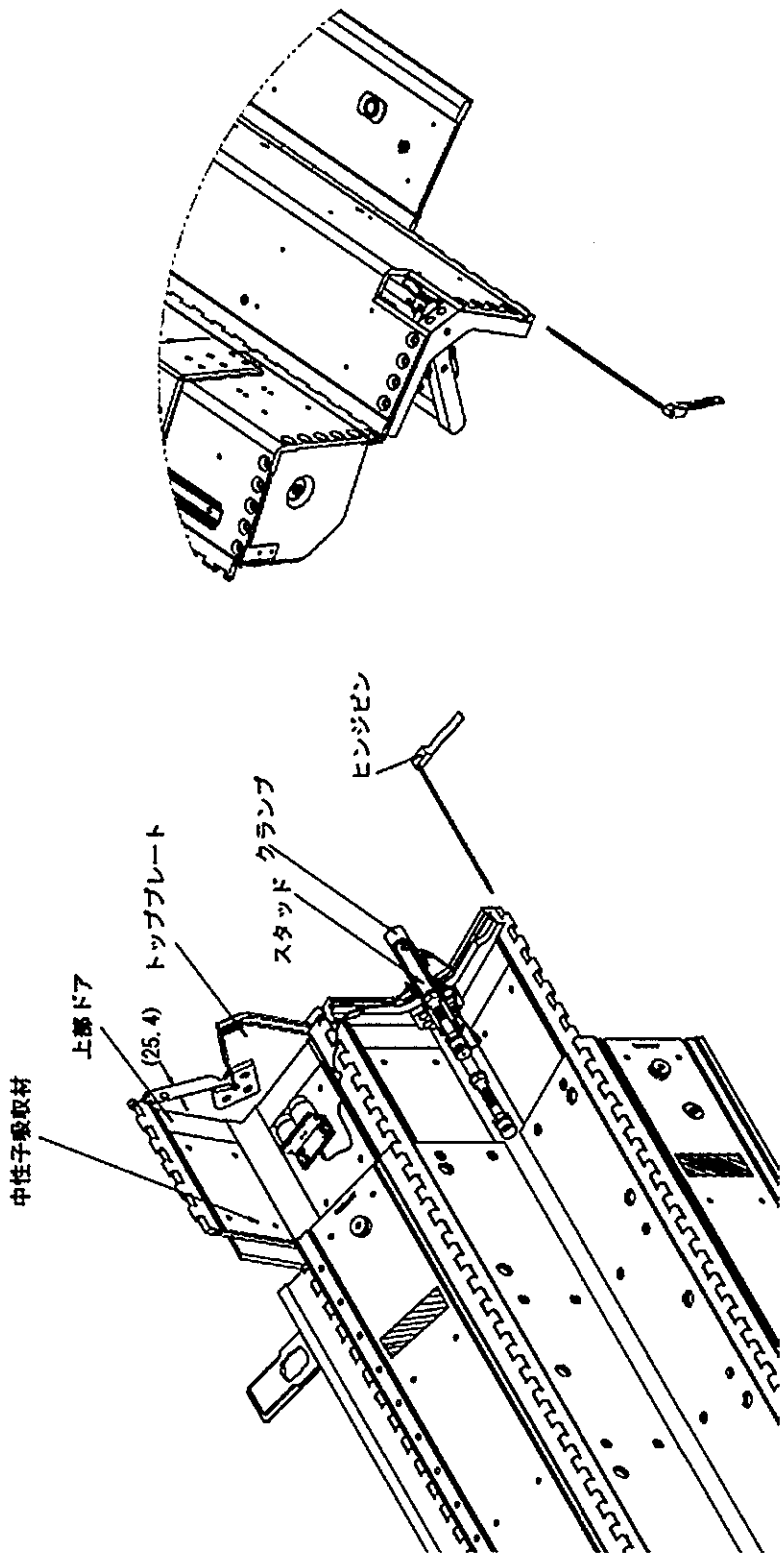
図(イ)-5 Traveller XL 型輸送物 下側ケース



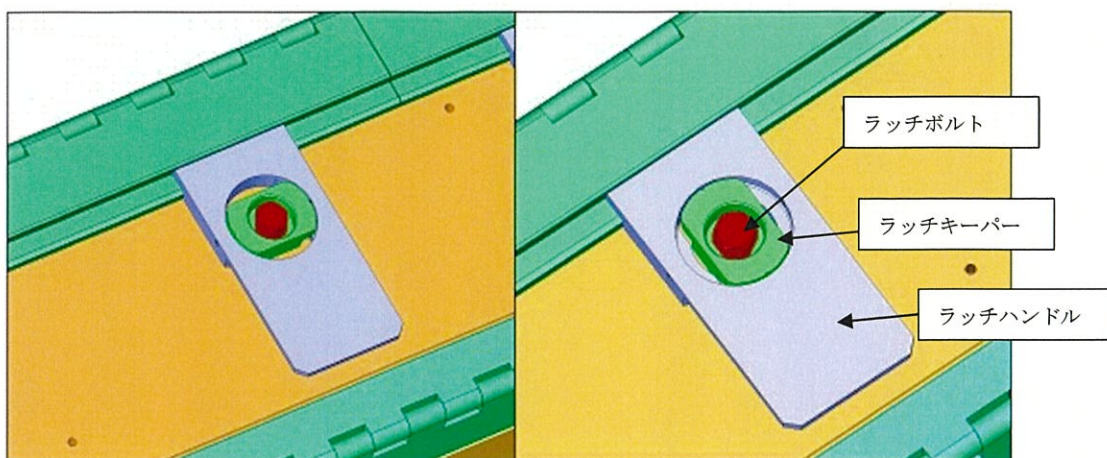
図(イ)-6 Traveller XL 型輸送物 ショックマウントの位置



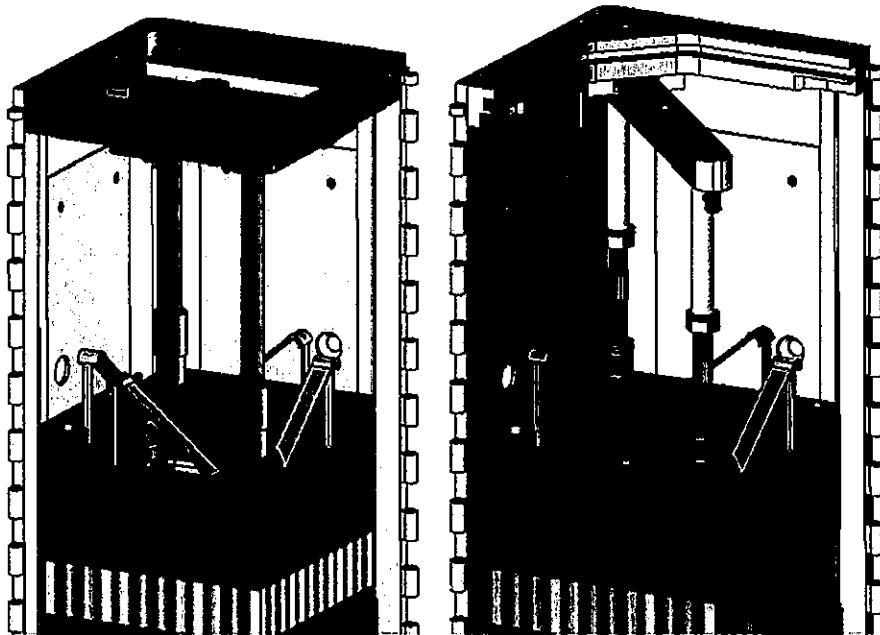
図(イ)-7 Traveller XL型輸送物 クラムシエル (RTPタイプ)



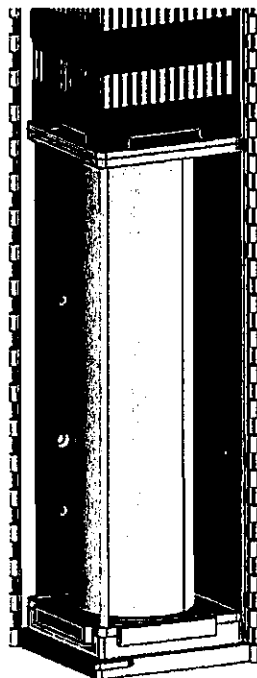
図(イ)-8 Traveller XL型輸送物 クラムシエル (FTPタイプ)



図(イ)-9 クラムシエルのラッチ機構 (左：ロック状態、右：アンロック状態)



図(イ)-10 スタッドによる収納物の固定 (左: RTP、右: FTP)



図(イ)-11 軸方向スペーサー

(イ)-D 輸送容器の収納物

本輸送容器に収納する核燃料物質は、最大 kgUO₂ の焼結研磨された未照射の二酸化ウラン焼結体（ペレット）又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体（ペレット）である。この核燃料物質の最大濃縮度は % であり、収納される状態としては、二酸化ウランペレット又はガドリニア入り二酸化ウランペレットをジルカロイ-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、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である。燃料集合体の形状を 図(イ)- 12 から 図(イ)- 15 に示す。

本輸送容器に収納するその他収納物は、図(イ)- 11 に示したアルミニウム合金製の軸方向スペーサーがある。

(1) 主要な核種の放射性物質の量

	232U	234U	235U	236U	238U	99Tc	合計
放射能量 (Bq)	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下

(2) 物理的形狀

焼結研磨された二酸化ウランペレット又はガドリニア入り二酸化ウランペレットをジルカロイ-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が収納物となる。

燃料集合体の構造は、図(イ)- 12 から 図(イ)- 15 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)- 16 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。なお、燃料集合体は、表面の保護のため、ポリエチレン製の袋を側面に巻いた状態で収納することがある。

(2)-1 収納物の構成要素

燃料集合体の主要な構成要素の数量は、次表の通りである。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。

形式	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	179 本	204 本	264 本	264 本
制御棒案内管	16 本	20 本	24 本	24 本
計装用案内管	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
上部ノズル	1 個	1 個	1 個	1 個
下部ノズル	1 個	1 個	1 個	1 個

(2)-2 収納物の重量

収納物である燃料集合体及びその構成材料の最大重量は次表に示す通りである。

項目	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
二酸化ウランペレット又は ガドリニア入り二酸化ウランペレット				
燃料棒				
二酸化ウラン重量				
燃料集合体重量				

(2)-3 収納物の構成材料

収納物である燃料集合体の構成材料は次の通りである。

上・下部ノズル	ステンレス鋼板 (SUS304L) 等
支持格子	インコネル (718 合金) 板、ジルカロイ-4 板
制御棒案内管	ジルカロイ-4 管
計装用案内管	ジルカロイ-4 管
燃料棒	
ペレット	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)
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)-4 収納物の主要寸法

燃料棒の主要寸法は次の通りである。

項 目	14×14,15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57
二酸化ウランペレット			
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。

(2)-5 耐熱性

燃料集合体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 \square MPa 及び \square MPa 以上に対し、385 °C においてはそれぞれ \square MPa 及び \square 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 \square MPa 及び \square MPa 以上に対し、385 °C においてはそれぞれ \square MPa 及び \square MPa 以上となる。

(3) 化学的性質

ウラン酸化物（ペレット）及びガドリニア入りウラン酸化物（ペレット）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、アルミニウム合金及びインコネルは、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ないので電気化学反応は発生しない。

また、ポリエチレン袋についても、化学的に安定な性質を有しており、輸送容器及び燃料集合体と化学反応を生じることなく、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ないので電気化学反応は発生しない。

(4) 材料密度

主要材料の密度は次の通りである。

二酸化ウランペレット	$1.04 \times 10^4 \sim 1.07 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$
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)	$7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

(5) 収納物の密封性

ペレットは、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。

(6) 最大崩壊熱量

本輸送容器の収納物は未照射のウラン酸化物又はガドリニア入りウラン酸化物であり、その崩壊熱量は無視できる。

(7) 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。

(8) 装荷制限

i) 濃縮度

wt% 以下

ii) 最大収納量

燃料集合体 1 体

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 C996-96 ECGU に準拠）

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

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

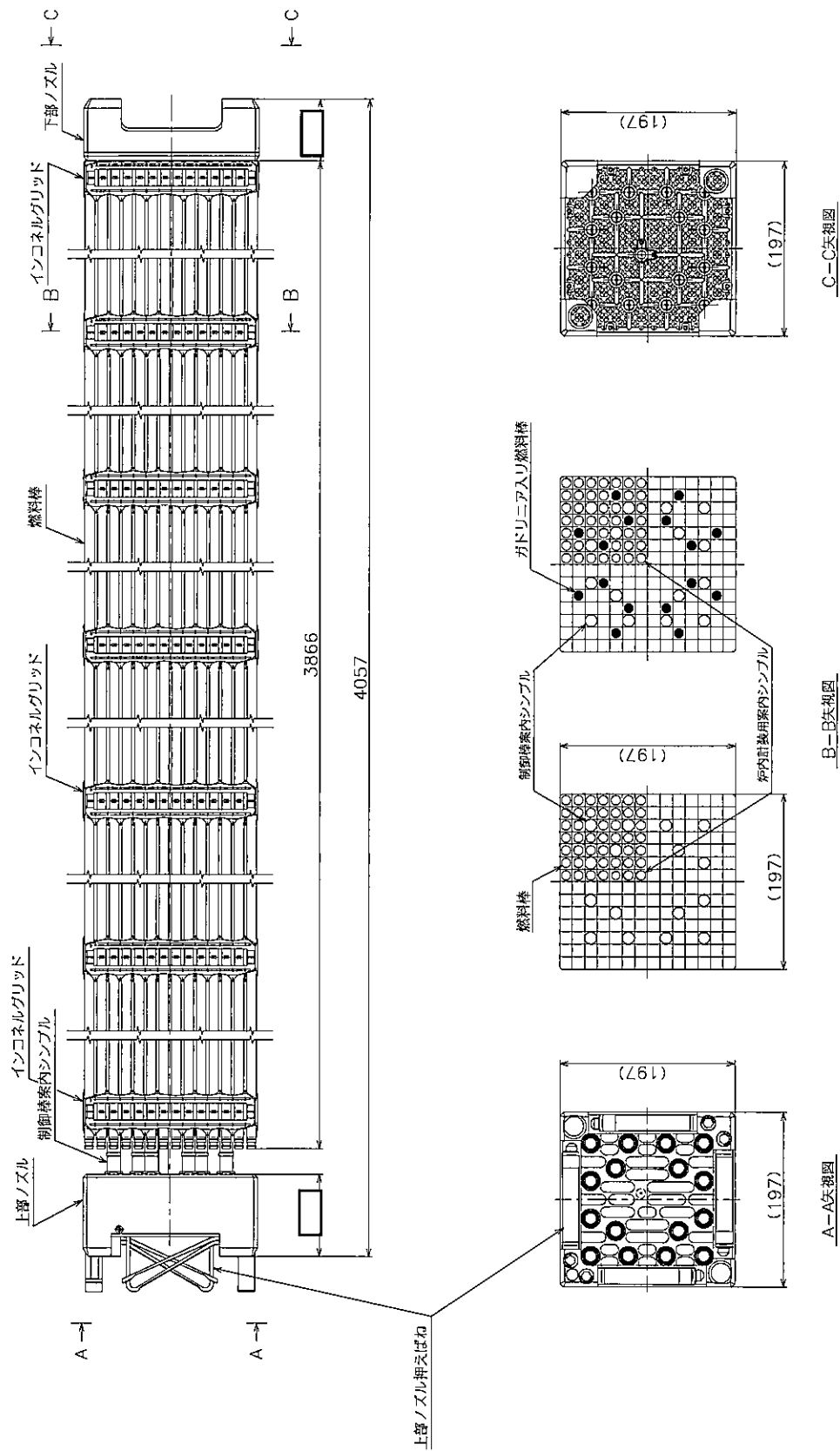
$$^{236}\text{U} \leq 250 \mu\text{g/gU}$$

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

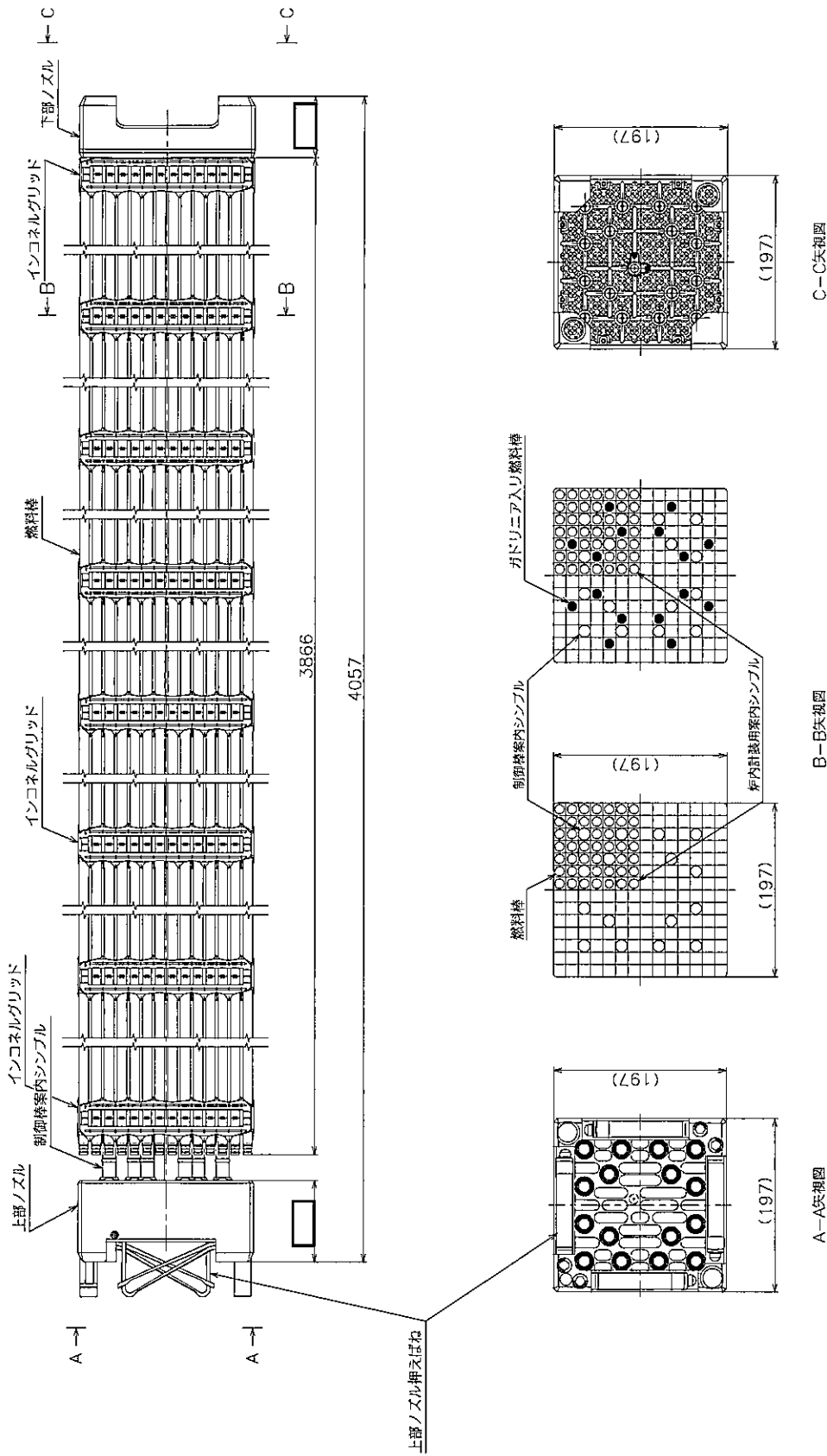
ただし、 $^{236}\text{U} < 125 \mu\text{g/gU}$ の場合は、 ^{232}U 及び ^{99}Tc は適用外

iv) ポリエチレンに関する制限

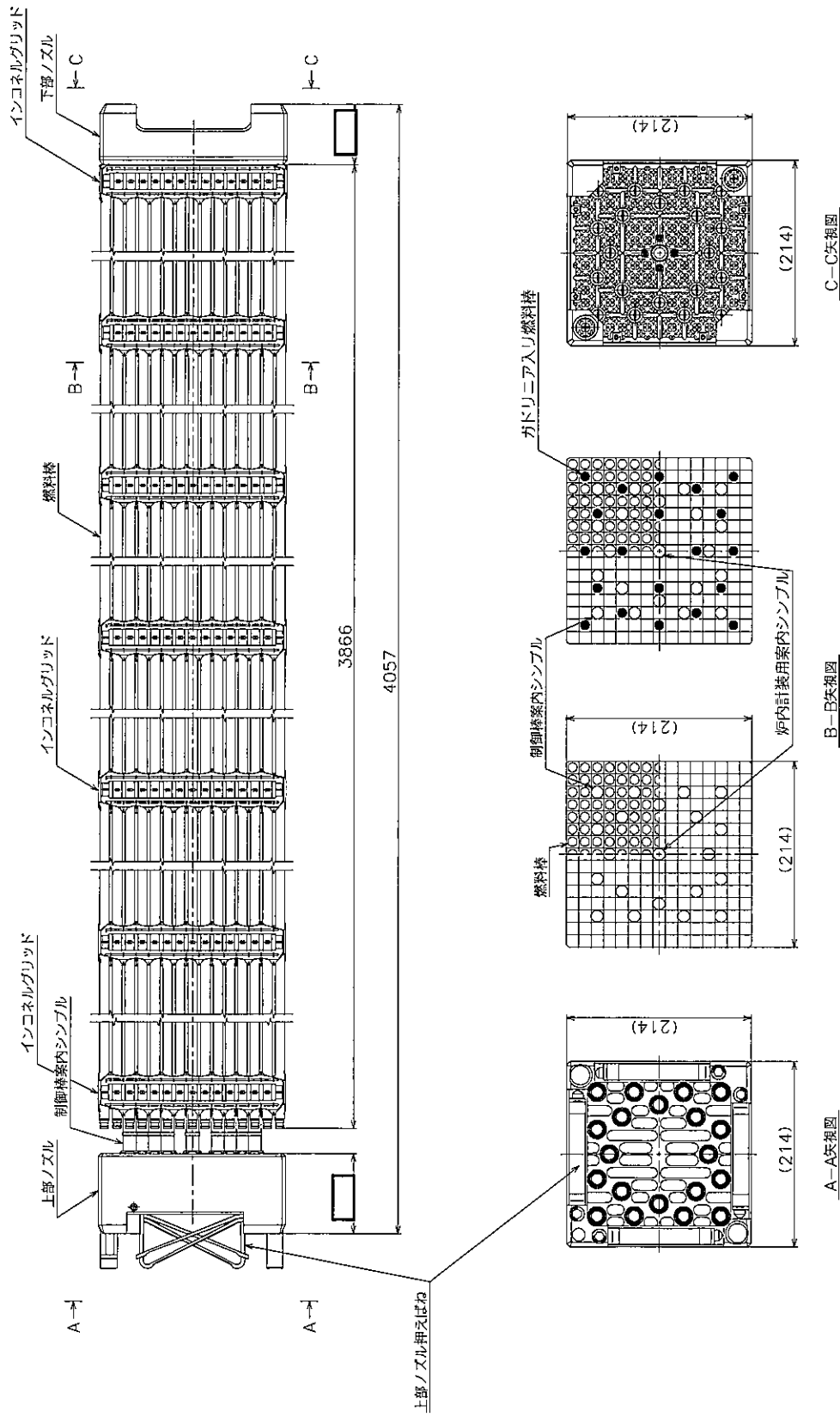
クラムシェル内のポリエチレン量は 2.00kg に制限される。なお、ポリエチレンの水素濃度は 0.1325 g/cm^3 以下である。



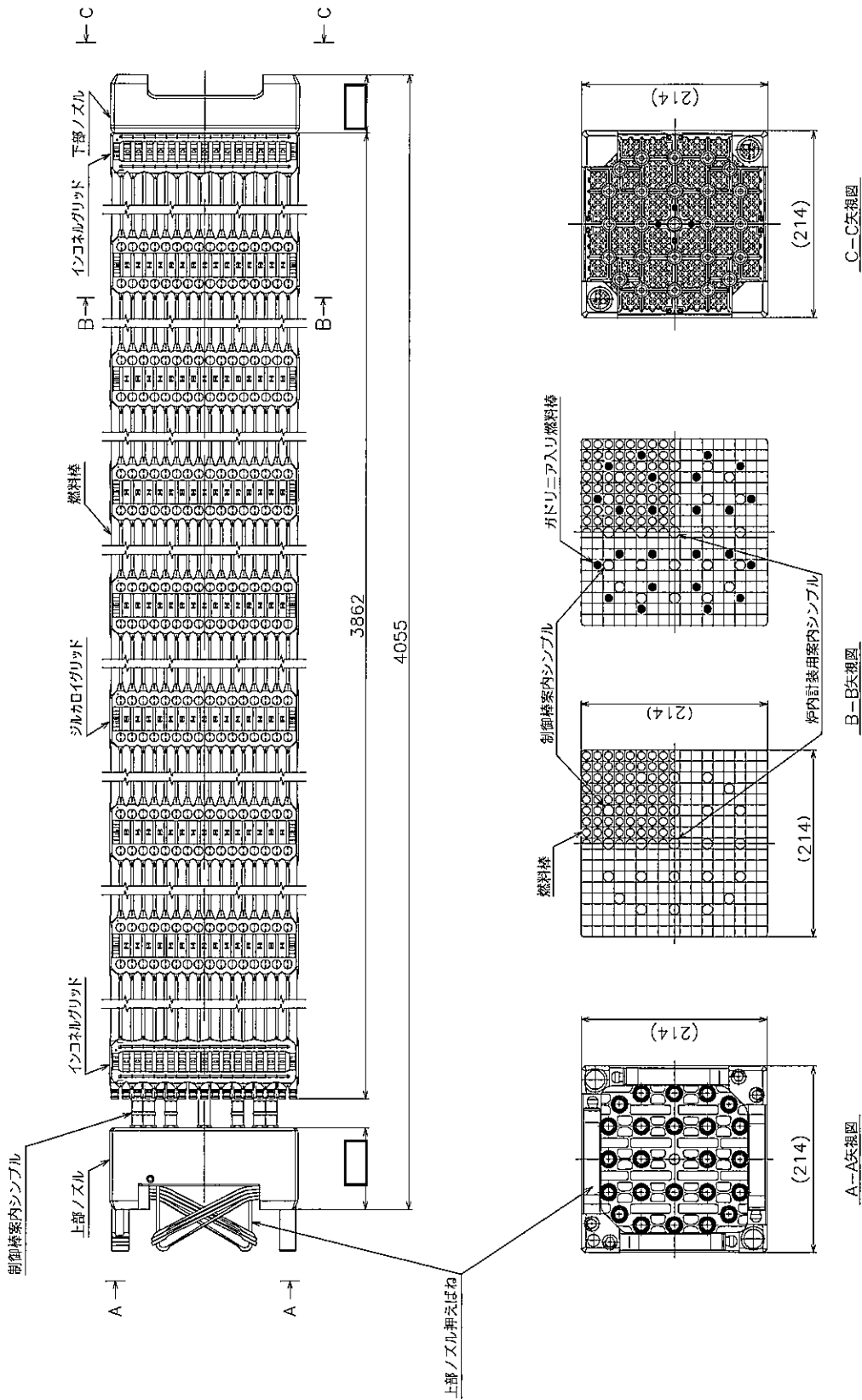
図(イ)-12 14×14-7グリッド型燃料棒集合体構造図



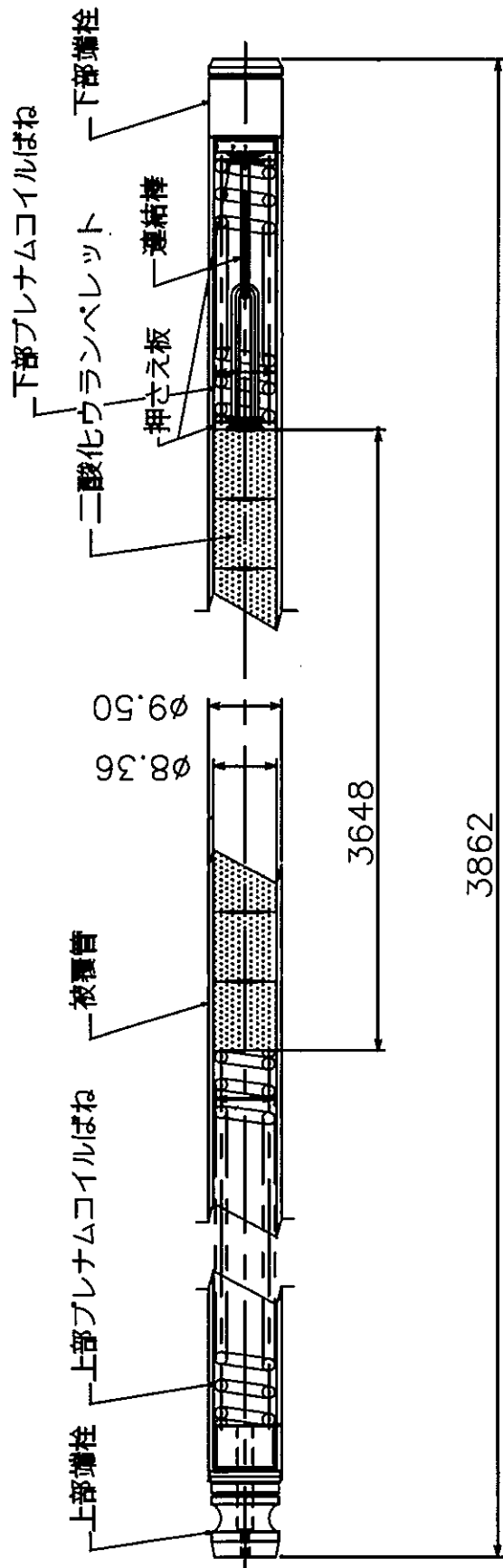
図(イ)-13 14×14-8グリッド型燃料集集体構造図



図(イ)-14 15×15型燃料集集体構造図



図(イ)-15 17×17型燃料集合体構造図



図(イ)-16 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「平成 2 年科学技術庁告示第 5 号（核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示）」（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 体の新燃料集合体を輸送するためのものである。本輸送容器は外容器及びクラムシェルと呼ばれる保護容器から構成される。外容器は、ステンレス鋼製の二重壁構造であり、落下時の衝撃及び火災時の熱の流入を緩和するため二重壁内に発泡ポリウレタンが充填されている。また、外容器の両端部には、落下時の衝撃を吸収するため衝撃吸収体及び枕型構造体が備わっている。外容器の上側ケースと下側ケースについては、ヒンジ及びボルトが側面両側を固定する構造となっている。

クラムシェルは、アルミニウム合金製板からなる箱型構造となっており、収納物の通常の取り扱い時の損傷を防止するとともに、輸送事故時の際の収納物の変形を制限する。クラムシェルは、ヒンジ及びラッチによって扉を固定する構造となっている。また、中性子吸収材である BORAL® 製板は、クラムシェル内側の全面に配置している。

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 に示す解析項目では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 $1/\sqrt{3}$ (0.577) 倍の値を使用する。なお、溶接効率については、鋼材の場合は参考文献 1 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 (1/3)

解析項目	条件										備考	
	参照図	材質	温度	設計負荷			解析方法			備考		
				種類	負荷係数	要素	適用式又は要素	解析基準				
1. 化学的及び電気的反応 (1) 化学的反応 (2) 電気的反応	—	—	-40 °C ~ □ °C	腐食	—	反応性	反応性の有無	化学的反応がないこと	—	—	化学的反応がないこと 異種材質間の電位差の無 位差がないこと	
	—	—	-40 °C ~ □ °C	腐食	—	電位性	異種材質間の電位差の有無	—	—	—	—	
2. 低温強度 (1) 外容器 (2) クラムシエル	—	SUS304	-40 °C	最低温度	1	低温強度	性能低下の有無 (低温脆性)	—	—	—	—	
	—	7%ニッケル合金	-40 °C	最低温度	1	低温強度	性能低下の有無 (低温脆性)	—	—	—	—	
3. 密封装置	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	該当せず
4. 吊上装置 (1) スタックアップラケット 吊り上げ孔 (2) スタックアップラケット 溶接部	図(ロ)A-10	SUS304	常温	輸送物重量	3	せん断応力	$\sigma = Q/A$	許容せん断応力	—	—	許容せん断応力	
	図(ロ)A-10	SUS304	常温	輸送物重量	3	せん断応力 組合せ応力	$\tau_x = F_x/A$ $\tau_y = F_y/A$ $\tau = \sqrt{(\tau_x^2 + \tau_y^2)}$	許容せん断応力	—	—	許容せん断応力	
5. 固縛装置	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	該当せず
6. 圧力 (1) 燃料棒 (2) 燃料棒溶接部	図(イ)-16	ジルコイ-4 ジルコニウム合金 ジルコイ-4 ジルコニウム合金	常温	周囲圧力	1	引張応力	$\sigma = PD/2t$	許容引張応力	—	—	許容引張応力	
	—	—	常温	周囲圧力	1	引張応力	$\sigma = PD/2t$	許容引張応力	—	—	許容引張応力	
7. 振動	—	—	—	—	—	振動	亀裂、破損の有無	—	—	—	—	

通常輸送時

表(ロ)A-1 構造解析設計基準 (2/3)

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	適用式又は要素	
1. 熱応力 (1) 燃料棒 (2) 燃料棒溶接部	図(イ)-16	ジルコニウム合金	□℃	最大内圧	1	引張応力	$\sigma = PD/2t$	許容引張応力
	図(イ)-16	ジルコニウム合金	□℃	最大内圧	1	引張応力	$\sigma = PD/2t$	許容引張応力
2. 水噴霧	—	—	常温	水噴霧	—	水浸透	—	材質劣化 内部浸水
3. 自由落下	表(ロ)A-6	SUS304	常温	1.2m 傾斜落下	—	変形	原型試験	変形量
4. 積み重ね (1) スタベンダブケット 溶接部 (2) 外容器 (3) 脚部	図(ロ)A-17	SUS304	常温	輸送物重量の5倍	1	せん断応力	$\tau = F/A$	許容せん断応力
	図(ロ)A-18	SUS304	常温	輸送物重量の5倍	1	座屈荷重	$P_{cr} = A \left(\sigma_y - \left\{ \frac{\sigma_y L}{\pi k} \right\}^2 \frac{1}{CE} \right)$	座屈荷重
	図(ロ)A-19	SUS304	常温	輸送物重量の5倍	1	座屈荷重	$P_{cr} = A \left(\sigma_y - \left\{ \frac{\sigma_y L}{\pi k} \right\}^2 \frac{1}{CE} \right)$	座屈荷重
5. 貫通 外容器	—	SUS304	常温	丸棒の1mから落下	1	容積貫通	$E_p = MGH$	$E_s = \frac{E}{2} \tau dt^2$

一般の試験条件

表(ロ)A-1 構造解析設計基準 (3/3)

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	適用式又は要素	
1. 落下試験 I (1) 収納物 (2) 外容器 (3) 中性子吸収材 (4) 中性子減速材	図(イ)-12~15	ジ/ルコイ-4 ジ/ルコイ-4合金	常温	9 m より落下	1	変形	原型容器試験	変形量 健全性
	図(イ)-1	SUS304	常温	9 m より落下	1	変形	原型容器試験	変形量
	図(イ)-1	BORAL®	常温	9 m より落下	1	中性子吸収材の損傷	原型容器試験	健全性
	図(イ)-1	超高分子量 ポリエチレン	常温	9 m より落下	1	中性子減速材の損傷	原型容器試験	健全性
2. 落下試験 II (1) 収納物 (2) ケース (3) 中性子吸収材 (4) 中性子減速材	図(イ)-12~15	ジ/ルコイ-4 ジ/ルコイ-4合金	常温	1 m より落下	1	加速度	原型容器試験	健全性
	図(イ)-1	SUS304	常温	1 m より落下	1	変形	原型容器試験	変形量
	図(イ)-1	BORAL®	常温	1 m より落下	1	中性子吸収材の損傷	原型容器試験	健全性
	図(イ)-1	超高分子量 ポリエチレン	常温	1 m より落下	1	中性子減速材の損傷	原型容器試験	健全性
3. 耐火試験	図(イ)-1	図(イ)-1	800℃	図(イ)-1	図(イ)-1	図(イ)-1	原型容器試験	図(イ)-1
4. 浸漬試験	図(イ)-1	図(イ)-1	図(イ)-1	図(イ)-1	図(イ)-1	図(イ)-1	図(イ)-1	臨界解析で 浸水を考慮

特別の試験条件

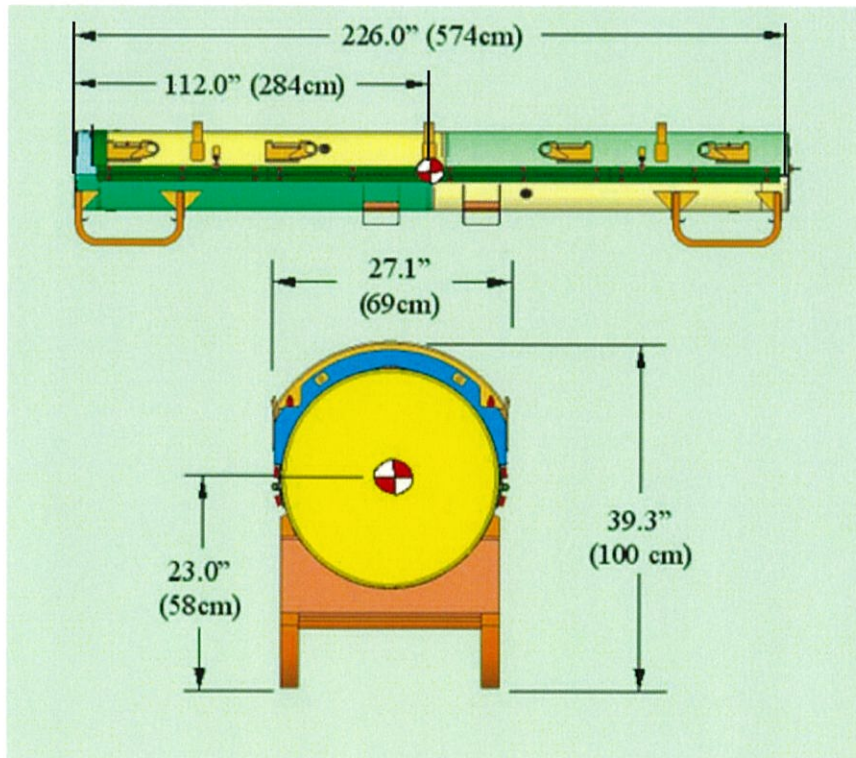
A.2 重量及び重心

輸送物の重量を表(ロ)A-2に示す。重心位置は図(ロ)A-1に示す通りである。

表(ロ)A-2 燃料集合体の重量 (最大重量)

(単位 : kg)

輸送容器重量	≤1,476
収納物 (設計最大重量) 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) 軸方向スペーサー	
輸送物総重量	



図(ロ)A-1 輸送物の重心位置

A.3 材料の機械的性質

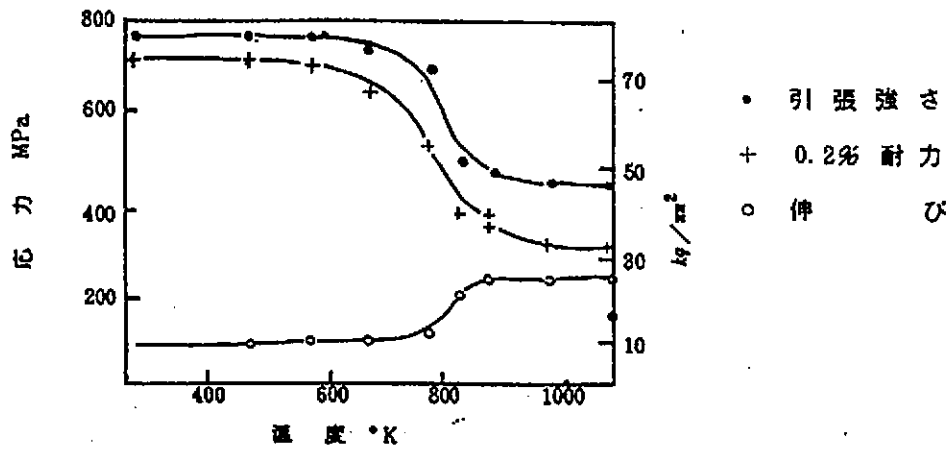
輸送容器を構成する主要構造材料の機械的性質を表(口)A-3に示す。

耐圧部のうちジルカロイ-4及びジルコニウム合金の溶接効率は、溶接により完全に焼なまされ则认为ると、図(口)A-2より□となる。

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		適用規格	備考
	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング率 (MPa)	許容せん断応力 (MPa)	許容引張応力 (MPa)		
ジルカローイ-4							
ジルコニウム合金 (80°C)	□	□	□	—	通常部： □		(参考) 室温時の降伏応力は□MPa
ステンレス鋼 SUS304	206	517	203,000	118 溶接部：71	206	ASTM A240 ASTM A276	※1 通常部の許容引張応力(□MPa)に溶接効率(□)を乗じた値 溶接効率 0.61 ¹⁾
アルミニウム合金 6005-T5	241	262	69,000	—	—	ASTM B221 ASTM B209	—
アルミニウム合金 6061-T6	241	262	69,000	—	—	ASTM B221 ASTM B209	—

¹⁾ 参考文献1「溶接・接合便覧(第2版)」より



図(口)A-2 ジルカロイ被覆管の焼きなましの効果

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



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

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。化学的に安定した材料を使用していること、また、中性子減速材に使用する超高分子量ポリエチレンやショックマウントに使用する天然ゴム等は金属の接触により化学反応を起こすことはないことから構成部品の材料相互み合わせで、危険な化学的又は電氣的反応は生じるおそれはない。

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
インコネル — ポリエチレン	(燃料集合体と梱包の袋)
ジルカロイ-4 ジルコニウム合金 — ポリエチレン	(同 上)
ステンレス鋼 — ポリエチレン	(同 上)
ステンレス鋼 — 超高分子量ポリエチレン	(容器内殻と減速材ブロック)
ポリエチレン — アルミニウム合金	(梱包の袋とクラムシェル) (梱包の袋と軸方向スペーサー)
ポリエチレン — ステンレス鋼	(梱包の袋とクランプ)
アルミニウム合金 — ステンレス鋼	(軸方向スペーサーとシアーリップ) (クラムシェルと ショックマウント軸)
ステンレス鋼 — 	(ショックマウント軸と ショックマウント) (燃料集合体とゴム製パッド)
ステンレス鋼 — ラバーコルク	(燃料集合体とクランプ (接触部))
アルミニウム合金 — 	(クラムシェルとショックマウント)
ステンレス鋼 — 発泡ポリウレタン	(容器内外殻と発泡体)

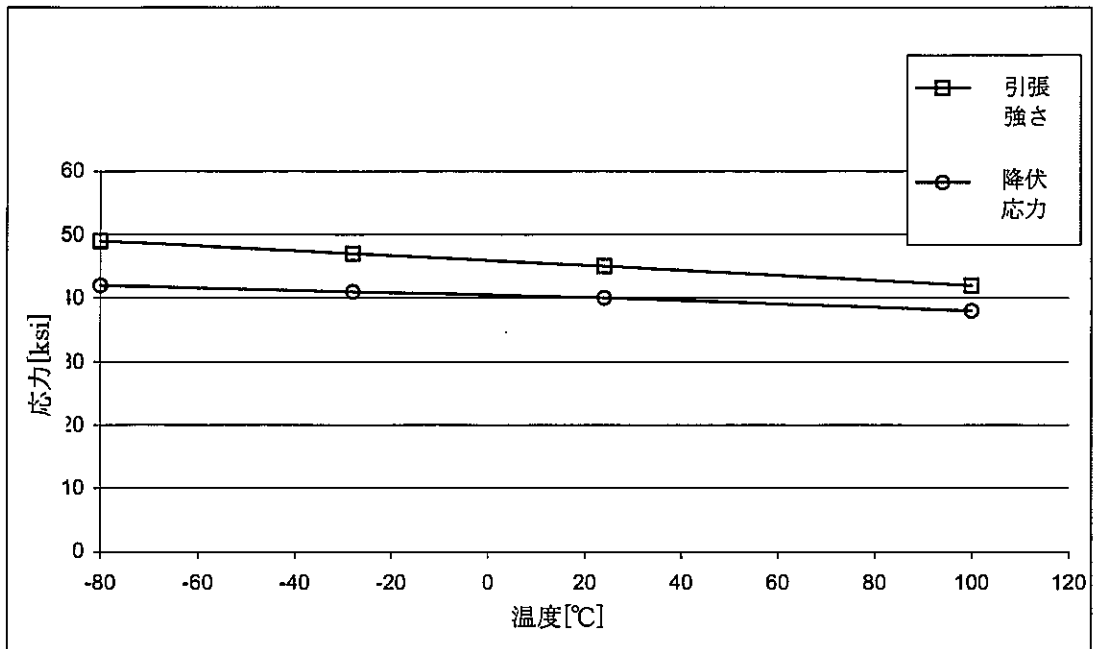
A.4.2 低温強度

A.4.2.1 金属材料の低温特性

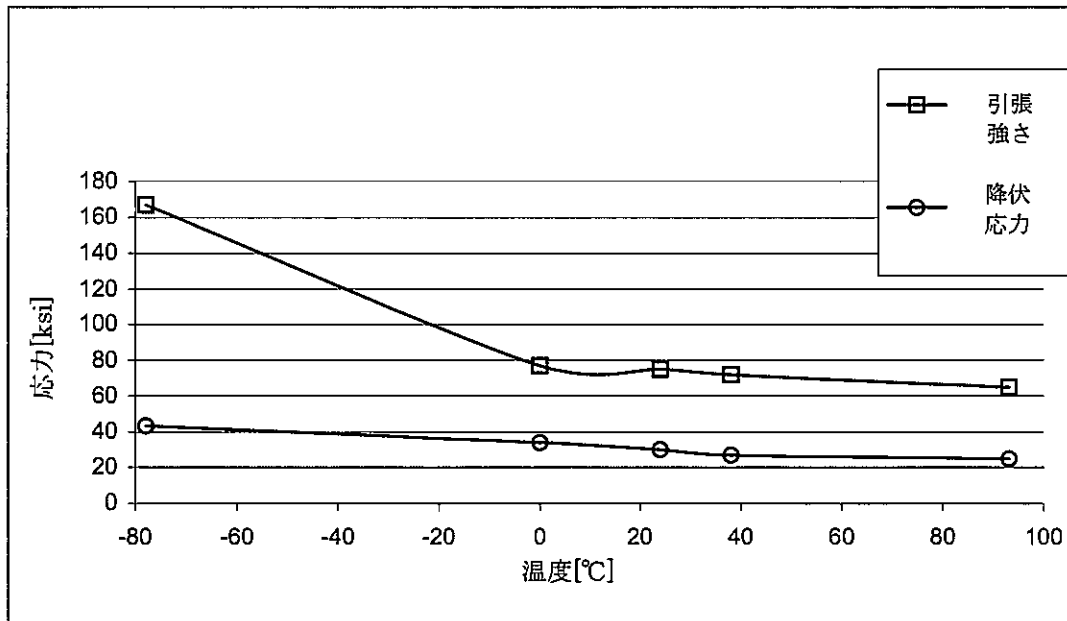
本輸送容器の構造を担保する材料はアルミニウム合金とステンレス鋼である。アルミニウム合金（6000系）とのステンレス鋼（SUS304）の引張特性温度依存性を図(ロ)A-3と図(ロ)A-4に示す。

アルミニウム及びその合金の一般的な特徴として、低温における脆性破壊やじん性低下がなく、図(ロ)A-3に示すように温度の低下とともに強度は上昇する。したがって、アルミニウム合金は低温において機能を損なうことはない。

SUS304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り、延性脆性遷移温度は -183°C 付近である。図(ロ)A-4に示すように、本輸送容器の使用下限温度 -40°C においては、温度の低下とともに機械的性質が向上する。したがって、ステンレス鋼は低温において機能を損なうことはない。



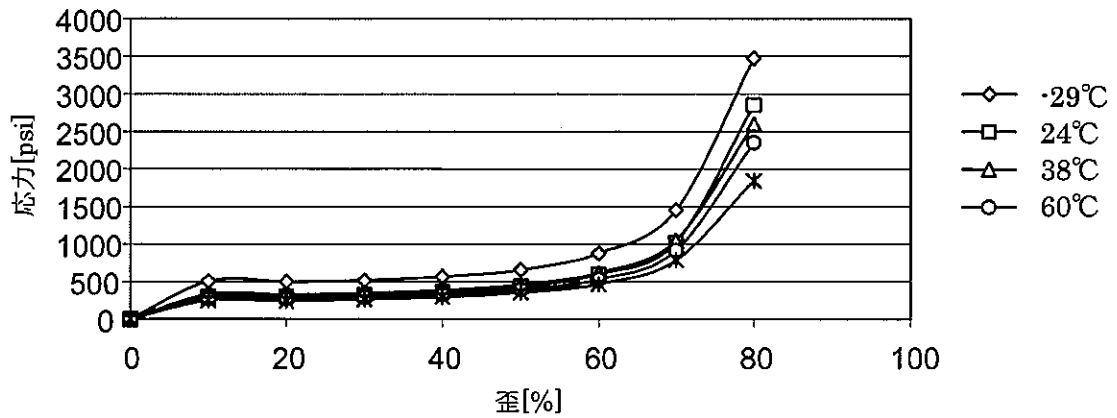
図(ロ)A-3 アルミニウム合金の引張特性温度依存性



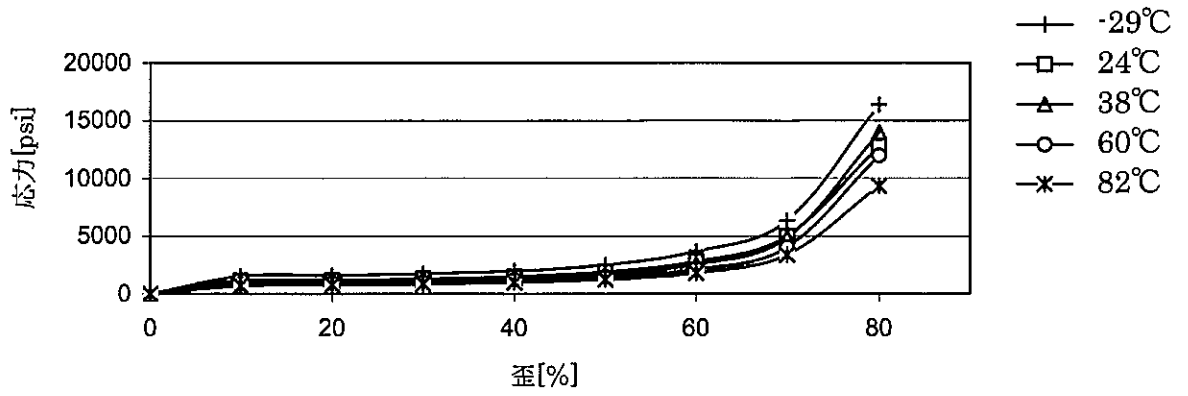
図(ロ)A-4 SUS304 の引張特性温度依存性

A.4.2.2 発泡ポリウレタンの低温特性

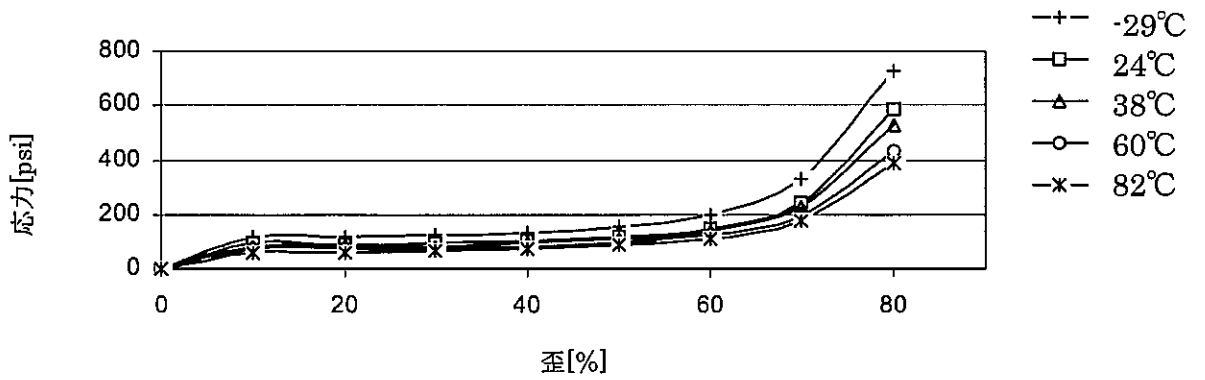
外容器の衝撃吸収及び断熱を担う発泡ポリウレタンについて述べる。図(ロ)A-5～図(ロ)A-7に10pcf、20pcf、6pcfの発泡ポリウレタンに対する温度ごとの圧縮強度を示す。これらの図より発泡ポリウレタンは、温度が低下すると圧縮強度が全体的に高まることわかる。そのため、本輸送容器の使用下限温度 -40°C においても、十分な強度を有すると考えられる。したがって、発泡ポリウレタンは低温において機能を損なうことはない。



図(ロ)A-5 発泡ポリウレタン(10pcf)の圧縮特性



図(ロ)A-6 発泡ポリウレタン(20pcf)の圧縮特性

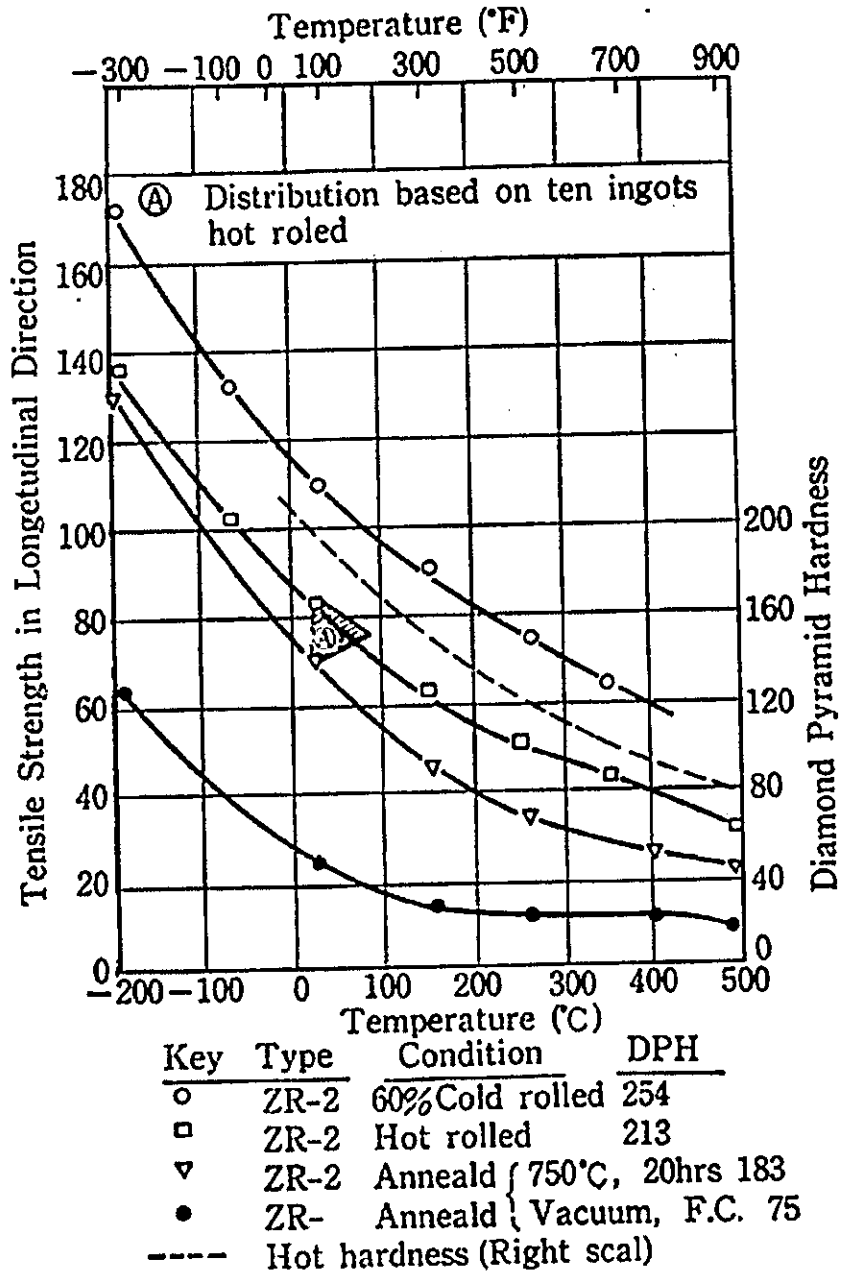


図(ロ)A-7 発泡ポリウレタン(6pcf)の圧縮特性

A.4.2.3 ジルカロイ-4、ジルコニウム合金被覆管の低温特性

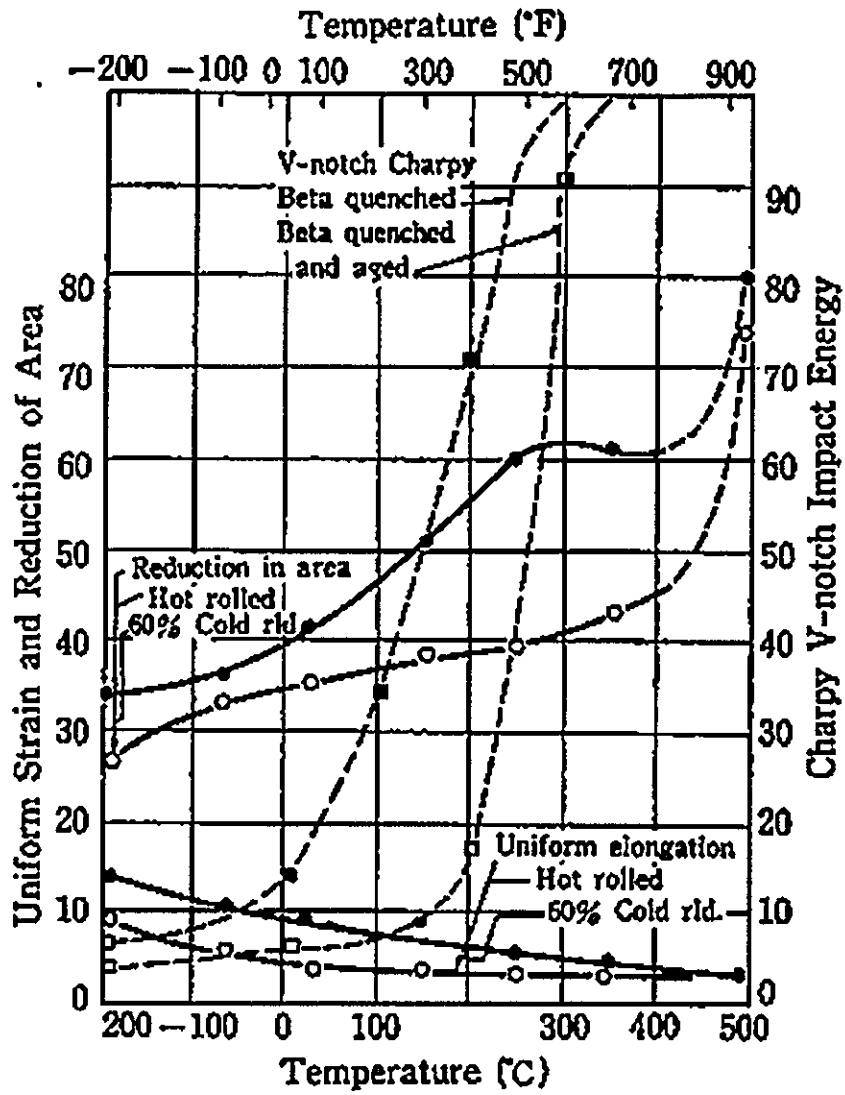
本輸送容器の密封境界としてはジルカロイ-4及びジルコニウム合金製の燃料被覆管が該当する。ジルコニウム及びその合金の低温特性を示すデータとして、ジルコニウム及びジルカロイ-2被覆管の引張強度及び延性の温度依存性及びを図(ロ)A-8と図(ロ)A-9に示す。

ジルコニウム及びその合金の一般的な特徴として、低温における脆性破壊やじん性低下がなく、図(ロ)A-8と図(ロ)A-9に示すように温度の低下によっても引張強度は上昇し、延性は確保される。したがって、ジルカロイ-4及びジルコニウム合金は低温において機能を損なうことはない。



図(ロ)A-8 ジルコニウム及びジルカロイ-2の引張強さの温度依存性

(出典) 小久保定次郎、原子炉用材料、昭和45年5月



図(ロ)A-9 ジルカロイ-2の延性の温度依存性

(出典) 小久保定次郎、原子炉用材料、昭和45年5月

A.4.3 密封装置

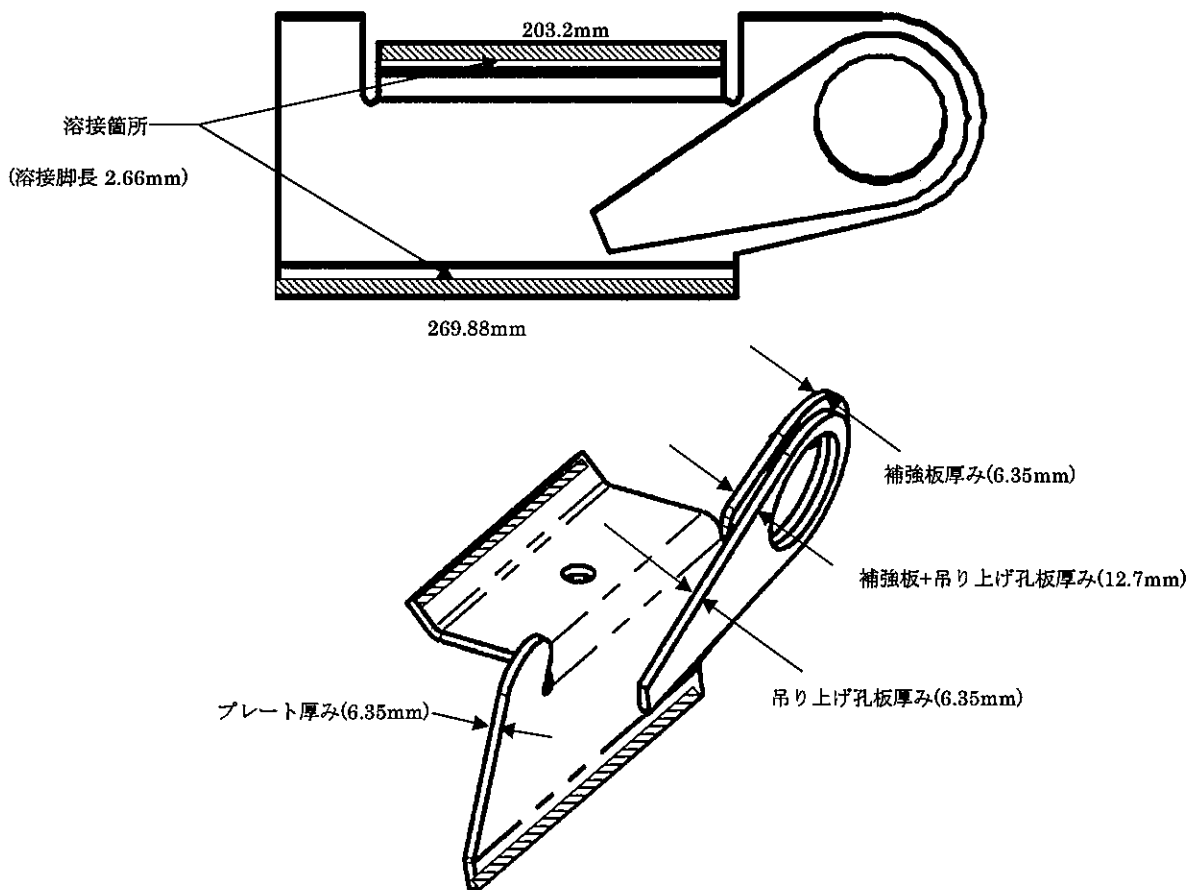
本輸送物の密封境界としては、燃料被覆管が該当し、本輸送容器には密封装置はない。

A.4.4 吊上装置

本輸送容器の吊上装置は図(イ)・1 に示すスタッキングブラケットである。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重量の 3 倍の荷重がかかった時でも十分容器の健全性を保つ構造となっている。

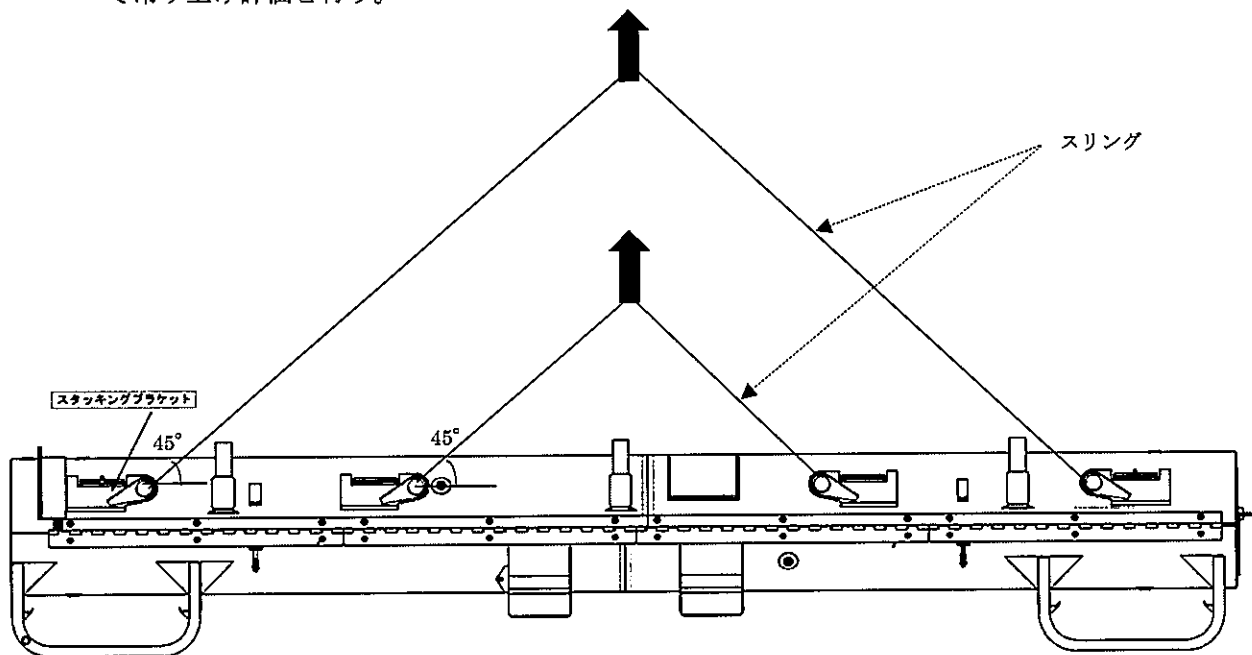
A.4.4.1 スタッキングブラケットに発生する応力

スタッキングブラケットの詳細を図(ロ)A-10 に示す。スタッキングブラケットは、厚さ 6.35mm の吊り上げ孔板と厚さ 6.35mm の補強板で構成されている。また、スタッキングブラケットは図(ロ)A-10 の斜線部にて外容器上側ケースの外板と溶接固定されている。

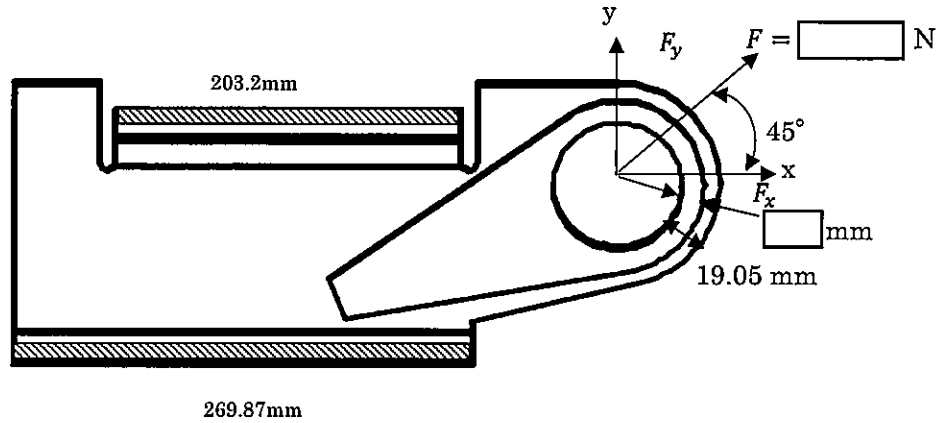


図(ロ)A-10 スタッキングブラケット詳細図

本輸送容器の吊り上げ作業は、図(ロ)A-11に示すように外側4つ、又は内側4つのスタッキングブラケットに対し、スリング4本を用いて行う。以降、最小吊り上げ角度（45度）において吊り上げ評価を行う。



図(ロ)A-11 Traveller XL 型輸送物吊り上げモデル



図(ロ)A-12 スタッキングブラケット及び吊り上げ孔にかかる力の成分

吊り上げ孔一箇所に加わる荷重の各成分(方向は図(ロ)A-12参照)を以下に算出する。

輸送物重量の3倍の荷重がかかった際の、垂直方向の吊り上げ荷重 F_1 は

$$F_1 = 3MG$$

ここで、

M 輸送物の重量 kg

G 重力加速度 9.80665m/s^2

よって、

$$F_1 = \text{} \text{ N}$$

となる。

ワイヤーロープ1本あたりの張力 F は、

$$F = \frac{F_1/4}{\sin 45}$$

よって

$$F = \text{} \text{ N}$$

また、吊り上げ孔にかかる、x方向の荷重 F_x 及びy方向の荷重 F_y は以下の通りである。

$$F_x = F(\cos 45)$$

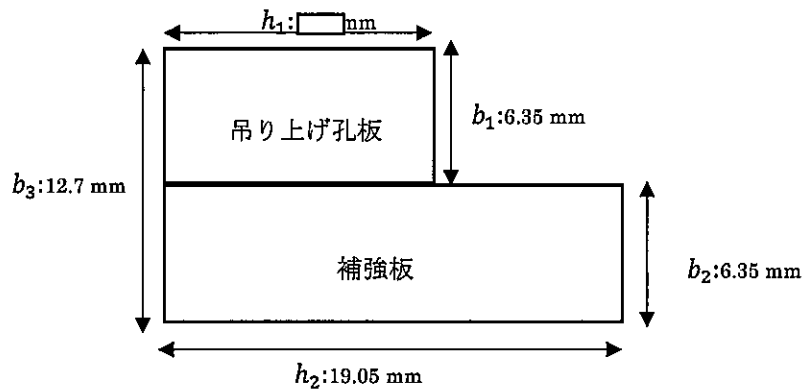
$$F_x = \text{} \text{ N}$$

$$F_y = F(\sin 45)$$

$$F_y = \boxed{} \text{ N}$$

吊り上げ孔にかかるせん断応力

吊り上げ孔板と補強板からなる吊り上げ孔の断面に引張力がかかる。吊り上げ孔の断面は、板厚 6.35 mm(b_1)×板幅 $\boxed{}$ mm (h_1)の吊り上げ孔板と、板厚 6.35 mm(b_2) ×板幅 19.05 mm (h_2)の補強板からなる。2つの板は溶接にて接合されており、一体ものの断面として評価する。2つの板の断面幅の和を b_3 (12.7 mm)とし、吊り上げ孔断面図を図(ロ)A-13に示す。



図(ロ)A-13 吊り上げ孔断面図

断面積 A は、板厚×幅より

$$A = b_1 h_1 + b_2 h_2 = \boxed{} \text{ mm}^2$$

図(ロ)A-14に示す通り、 $F = 22,717.0 \text{ N}$ の引張荷重が作用した場合、吊り上げ孔の上下にそれぞれ $F/2$ の反力が発生し、これはつり上げ孔にかかるせん断力に該当する。せん断力 Q は、

$$Q = F/2 = \boxed{} \text{ N}$$

となる。最大せん断応力 τ は、以下の式にて導出される。

$$\tau = SQ/b_3 I$$

ここで、 S (断面一次モーメント)、 I (断面二次モーメント)である。各要素は以下の式にて表される。

$$S = A/2 + e/2$$

$$I = (b_1 h_1^3/12 + b_1 h_1 \times (e - h_1/2)^2) + (b_2 h_2^3/12 + b_2 h_2 \times (e - h_2/2)^2)$$

ここで e (吊り上げ孔断面図心)は、

$$e = (b_1 h_1 \times h_1/2 + b_2 h_2 \times h_2/2)/A$$

と表される。

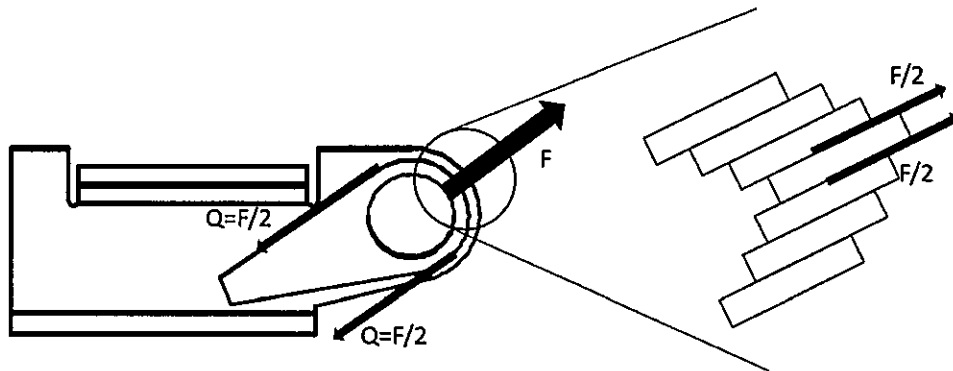
これらの式より、最大せん断応力 τ は

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

となる。

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 118MPa である。このため、発生応力は基準値より小さく、安全率は以下の通りとなる。

$$\text{安全率} = \frac{118}{\quad} = \quad$$



図(ロ)A- 14 吊り部にかかるせん断力図

溶接部にかかるせん断応力

スタッキングブラケットの溶接部は図(ロ)A- 10 の斜線部である。溶接有効長 h は $203.2 + 269.87 = 473.07$ mm、溶接脚長 l は 2.66 mm であり、溶接断面積 A は

$$A = h \times l \times \sin 45 = 889.79 \text{ mm}^2$$

となる。

また、水平方向の荷重は $F_x = \quad$ N、垂直方向は $F_y = \quad$ N であるため、溶接部のせん断応力 τ_x 、 τ_y は以下ようになる。

$$\tau_x = F_x/A$$

及び

$$\tau_y = F_y/A$$

よって

$$\tau_x = \quad \text{MPa 及び}$$

$$\tau_y = \quad \text{MPa}$$

せん断応力 τ_x 及び τ_y は互いに直角であり、組み合わせ応力は以下の通りとなる。

$$\tau = \sqrt{(\tau_x^2 + \tau_y^2)}$$

よって

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

SUS304 の溶接部の許容せん断応力は表(ロ)A- 3 より 71 MPa である。発生応力は基準値より小さく、安全率は以下の通りとなる。

$$\text{安全率} = \frac{71}{\boxed{}} = \boxed{}$$

A.4.5 固縛装置

運搬する際には車輛や運搬用コンテナにワイヤや専用の固縛部材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

本輸送容器は密封されておらず、輸送容器内外で差圧が生じることはない。一方、密封境界である燃料棒の健全性について評価する必要がある。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。周囲の圧力が 60 kPa(a)まで低下すると、密封境界である燃料棒との差圧（ゲージ圧）は、最大内圧 $\boxed{}$ Pa（「B.4.4 最大圧力」において太陽輻射を考慮して得られた燃料棒最大内圧）を用いると $\boxed{}$ MPa となり、この内外圧差が被覆管に作用することになる。

被覆管の材質は、ジルカロイ-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。

$$\sigma_{\theta} = \frac{PD}{2t}$$

ここで、

σ_{θ}	被覆管にかかる円周方向応力	MPa
P	内圧	□ MPa
D	被覆管内径	$\left\{ \begin{array}{l} 9.40 \text{ mm (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型)} \\ 8.36 \text{ mm (17} \times \text{17 型タイプ 57)} \end{array} \right.$
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 (被覆管部) 及び □ MPa (溶接部) である。

したがって、燃料棒の被覆管に発生する応力は基準値より小さく、安全率は以下の通りである。

$$\text{安全率 (燃料棒)} = \frac{\square}{\square} = \square$$

$$\text{安全率 (燃料棒溶接部)} = \frac{\square}{\square} = \square$$

A.4.7 振動

固有振動数解析の結果、本輸送容器の固有振動数は \square Hz である (詳細は、「(ロ)A 付属資料 6」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-15 に示すように、振動数比 \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 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。

容器の径方向に輸送物の \square 倍の荷重が発生した場合については、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 \square 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から、輸送容器に破損、亀裂が生じるおそれはない。

容器の軸方向に \square 倍の荷重がかかった際の、軸方向の端部に発生する荷重 F は

$$F = \square MG$$

ここで、

M 輸送物の重量 \square kg

G 重力加速度 9.80665m/s²

よって、

$$F = \square \text{ N}$$

となる。

ポリウレタンが変形するのに必要な軸方向の荷重 F_1 は、

$$F_1 = \pi \times \left((D/2)^2 - ((D-2t)/2)^2 \right) \times \sigma$$

ここで、

D 外容器のポリウレタンの外径 (外容器の外径-外板厚) 632.3mm

t 外容器のポリウレタン厚さ (最薄部) \square mm

σ ポリウレタン (10pcf) の圧縮強度 \square MPa

よって、

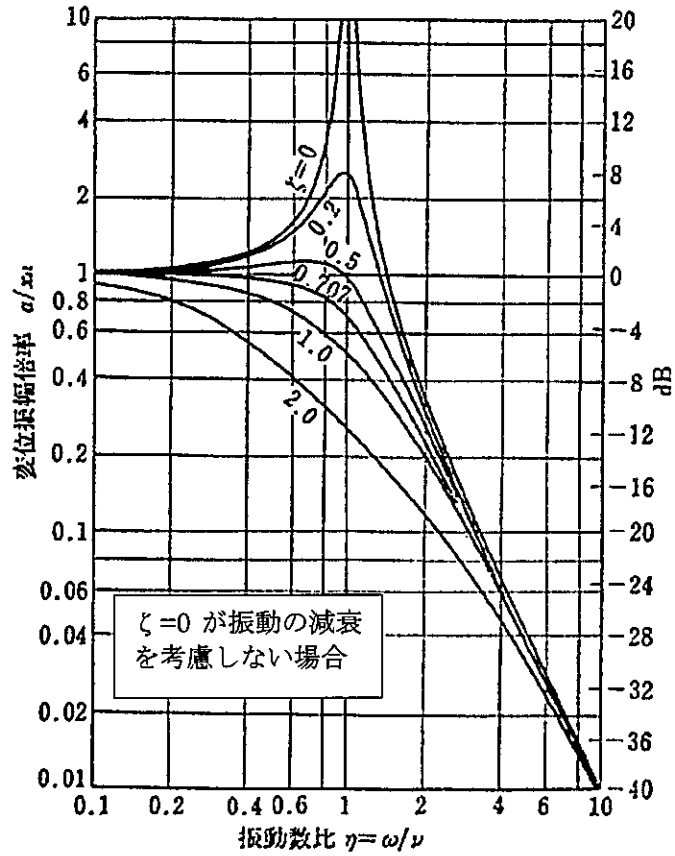
$$F_1 = \square \text{ N}$$

となる。

$F < F_1$ となるため、容器の軸方向に発生する振動によって、ポリウレタンに変形は生じないことから、輸送容器に破損、亀裂が生じるおそれはない。

以上のことから、輸送容器が変形し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。

なお、Traveller XL 型輸送物は世界中で多くの輸送実績があるが、振動によって収納物も含めて輸送物が破損したという報告はない。



図(ロ)A-15 力による強制振動の共振曲線²

² 参考文献 2 実用 機械振動学, 國枝正春, 1984

A.5 一般の試験条件

A.5.1 熱的試験

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°C 太陽ふく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、「(ロ)B.4 一般の試験条件」において環境温度 38°C 太陽輻射下で 1 週間置くとした条件で評価している。

本輸送物は被覆管を密封境界に設定しており、太陽ふく射条件下に 1 週間置いた際に燃料棒の密封性が維持されることを評価により確認する。

「(ロ)B.4 一般の試験条件」で得た輸送物の最高温度 □°C から最低温度 -40°C までを考慮する。

A.5.1.1 温度及び圧力の要約

一般の試験条件における温度及び圧力は、太陽ふく射熱による輸送物の最高温度とその温度上昇による最高圧力から求める。「(ロ)B.4 一般の試験条件」に示す解析結果より一般の試験条件下で輸送物最高温度は外容器外表面で □°C である。保守的な仮定として容器内部温度も外容器外表面と均一とみなし、□°C であるとして本輸送物の密封境界である燃料棒内圧を求めると絶対圧 □ Pa となる。初期条件を 0°C、1 気圧 (1.01 × 10⁵ Pa) として燃料棒の最大内外圧差を求めるとゲージ圧 □ Pa となる。

A.5.1.2 熱膨張

外容器の主要の構造材はステンレス鋼からなり、クラムシエルの主要構造材はアルミニウム合金からなるが、外容器とクラムシエルはゴム製のショックマウントを介して接続されているため、熱膨張差はショックマウントにて吸収される。

クラムシエルと燃料集合体の間については、熱膨張差によって発生する応力が最も大きくなる条件として、以下の条件を考慮する。

- ・燃料集合体を □°C で装荷し、最低温度 -40°C で輸送する
- ・長手方向を考慮する
- ・燃料集合体、軸方向スペーサー、スタッドの線熱膨張係数は、アルミニウム合金との熱膨張差が大きくなる被覆管の線熱膨張係数で代表する

熱膨張量は以下の式で表される。

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0$$

$$\Delta L \quad \text{熱膨張量 mm}$$

α 線熱膨張係数 1/K

ΔT 温度変化 K

L_0 初期長さ mm

ここで、

$$\Delta T = \square \text{ K}$$

アルミニウムの線熱膨張係数 α_{Al} : $2.262 \times 10^{-5} / \text{K}$

ジルカロイ-4 及びジルコニウム合金の線熱膨張係数 α_{Zr} : $4.441 \times 10^{-6} / \text{K}$

$L_0 = 5130.8 \text{ mm}$ (クラムシエルの全長)

から

$$\Delta L_{Al} - \Delta L_{Zr} = (\alpha_{Al} - \alpha_{Zr}) \Delta T L_0 = \square \text{ mm}$$

軸方向スペーサーと集合体との間には $\square \text{ mm}$ のゴム製のパッドがあり、スタッドと燃料集合体の接触部は $\square \text{ mm}$ のラバーコルクがあるため、これらによって熱膨張差は吸収される。

このため熱膨張による顕著な応力は発生しない。

A.5.1.3 応力計算

本輸送物の外容器に密封装置はなく、容器の内外圧力差により応力が発生することはない。よってここでは密封境界である燃料棒に発生する応力のみ評価する。

被覆管の材質は、ジルカロイ-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。

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 σ_θ である。

$$\sigma_\theta = \frac{PD}{2t}$$

ここで、

σ_θ 被覆管にかかる円周方向応力 MPa

P 内外差圧 $\square \text{ MPa}$

(「B.4.4 最大圧力」において太陽輻射を考慮して得られた燃料棒最大内外差圧)

D 被覆管内径 $\left\{ \begin{array}{l} 9.40 \text{ mm} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型}) \\ 8.36 \text{ mm} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57) \end{array} \right.$

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

これらを用いると

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

燃料棒の材質は、ジルカロイ-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 486 MPa (被覆管部) 及び \square MPa (溶接部) である。したがって、燃料棒の被覆管に発生する応力は基準値より小さく、安全率は以下の通りである。

$$\text{安全率 (燃料棒)} = \frac{\square}{\square} = \square$$

$$\text{安全率 (燃料棒溶接部)} = \frac{\square}{\square} = \square$$

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-5 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。

表(ロ)A-5 許容応力と解析値の比較

項目	解析基準値	解析評価値	安全率
燃料棒	\square MPa	\square MPa	\square
燃料棒溶接部	\square MPa	\square MPa	\square

A.5.2 水噴霧

本輸送容器の外容器外板の材質は耐食性の高い SUS304 で覆われている。このため、水噴霧による外表面の材料劣化はない。外容器のフランジ部はその内側が 1 段高くなる形状となっており、外容器の上下ケースの隙間からの雨水の浸入を防止する構造となっている。したがって、水噴霧による輸送物内への浸水はなく、輸送物内部の材料劣化及び浸水による重量増加は生じない。

A.5.3 自由落下

本輸送物は、総重量 5,000kg 以下であるので、告示別記第三号ロ(1)に基づき、落下の高さは 1.2m として、原型試験を実施しその結果により安全性を示す。

(a) 解析モデル

落下試験を実施しており、解析は実施していない。

(b) 原型試験

原型試験の詳細を「(ロ)A 付属資料 1 落下試験結果報告書」に示す。原型試験においては試作試験、認定試験、認証試験の 3 つの試験ユニットが実施され、一般の試験条件及び特別の試験条件における一連の落下試験が行われた。試作試験においては 2 つの原型容器(以降、Prototype-1、Prototype-2 と称す)、認定試験においては 2 つの原型容器 (以降、QTU-1、QTU-2 と称す)、認証試験においては 1 つの原型容器(以降、CTU と称す)に対し、A 型輸送物に要求される一般の試験条件下での自由落下試験(1.2m)、核分裂性輸送物に要求される特別の試験条件下での 9m 落下試験及び 1m ターゲット試験が実施された。原型容器の中で、1.2m の自由落下試験が実施されたのは Prototype-2、QTU-1、QTU-2 及び CTU である。なお各試験において試験体が受ける落下エネルギーと、輸送物最大重量において技術基準下での落下試験条件にて輸送物が受ける落下エネルギーを比較し、試験体における各落下試験の保守性を説明した資料を「(ロ)A 付属資料 2」に示す。

本試験に供した原型容器内には、二酸化ウランペレットの重量を模擬するために鉛ペレットを挿入した模擬燃料集合体を装荷した。なお、当該集合体は 型の長尺燃料集合体 (燃料集合体) であり、各落下試験で用いられた 5 体の集合体平均重量は約 kg であった。模擬燃料集合体の詳細仕様は「(ロ)A 付属資料 1」に示す。また、模擬燃料集合体と収納物の燃料集合体を比較検討し、垂直落下時における燃料集合体の健全性を説明した資料を「(ロ)A 付属資料 3」に示す。水平落下時における燃料集合体の健全性を説明した資料を「(ロ)A 付属資料 4」に示す。

試験はオハイオ州コロンビアナにある Columbiana High Tech Company にて実施した。本試験台は、深さ約 m 重量約 t のコンクリートの上に厚さ mm、広さ m × m の鉄板を敷いたものである。試験台の詳細は「(ロ)A 付属資料 1」に示す。


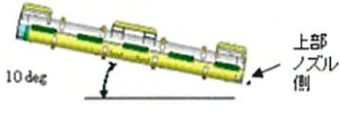
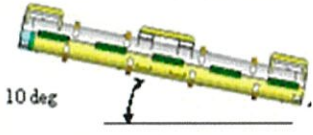

結果の要約を表(ロ)A-6 に示す。いずれの場合においても、外容器に大きな損傷は見られなかった。また、A.9.2.1.5 に後述するように、自由落下試験よりも厳しい落下試験 I でも、コーナー落下、水平落下、傾斜落下では、変形は外容器端部の衝撃面局所と外容器上面の補強リング、外容器下面の脚に限られた点や垂直落下 (高さ 10m) においても外容器の胴体部分の圧縮

変形量は最大□mm程度であったことを考慮すると、1.2m落下での変形量はごく小さいものになる。さらに、落下試験Ⅰにおいて収納物の燃料集合体の燃料棒に亀裂が発生しないことを考えると、自由落下試験においても燃料棒の密封性は保たれるといえる。

(c) モデル試験

モデル試験は実施していない。

表(ロ)A-6 自由落下試験結果

	落下姿勢		試験結果
Prototype-2	1.2m 20° 傾斜落下 外容器上側ケースの下部ノズル側から落下		下部ノズル側端部が局所変形 (幅 228.6mm、長さ 63.5mm、 深さ 19.1mm 変形)
QTU-1	1.2m 10° 傾斜落下 外容器上側ケースの上部ノズル側から落下		上部ノズル側端部が局所変形 (幅 254.0 mm、長さ 152.4 mm、深さ <input type="text"/> mm 変形)
QTU-2	1.2m 10° 傾斜落下 外容器上側ケースの上部ノズル側から落下		上部ノズル側端部が局所変形 (幅 241.3 mm、長さ 152.4 mm、深さ 22.2 mm 変形)
CTU	1.2m 9° 傾斜落下 外容器上側ケースの上部ノズル側から落下		上部ノズル側端部が局所変形 (幅 215.9 mm、長さ 76.2 mm、 深さ 25.4 mm 変形)

A.5.4 積み重ね試験

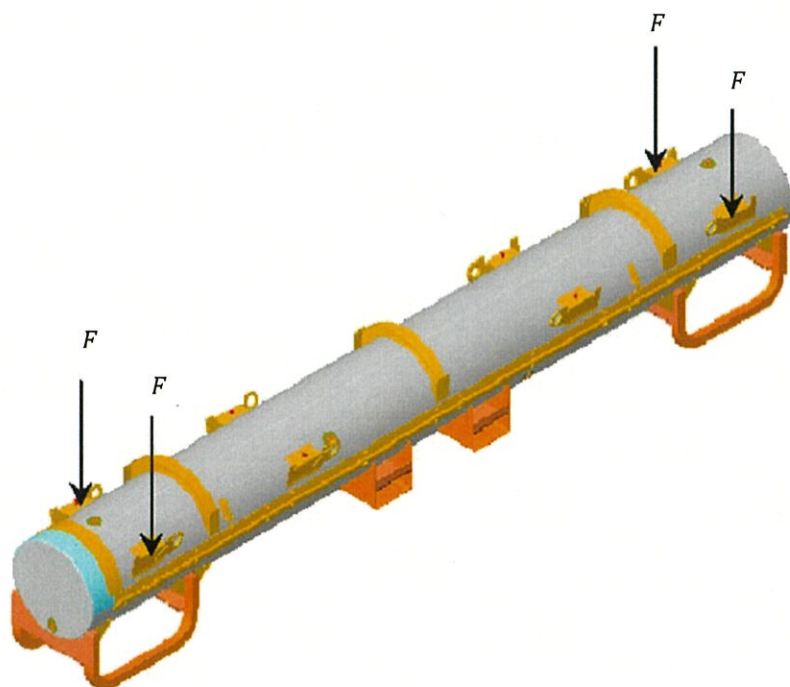
告示別記第三号ロ(3)で要求されている圧縮試験については、計算により評価した。輸送物の自重の5倍又は輸送物の鉛直投影面積に13kPaを乗じた荷重のいずれか大きいほうに等しい圧縮力を供試物に加える場合を考える。ここで、輸送物の5倍の荷重を W_a 、13kPa×鉛直投影面積の荷重を W_b とすると、

$$W_a = 5 \times \square \times 9.80665 = \square \text{ N}$$

$$W_b = 13,000 \times \square = \square \text{ N}$$

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

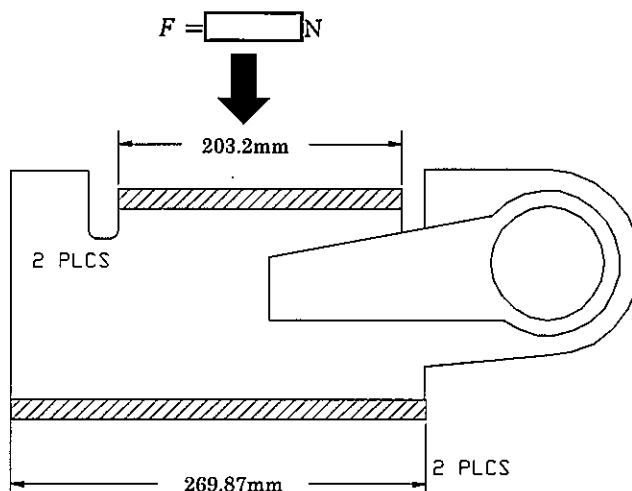
図(ロ)A-16に示すようにこの荷重はすべて輸送容器の上側ケースに4箇所あるスタッキングブラケットで支持され、スタッキングブラケットの溶接部から、外容器の上側ケース、下側ケースを介して脚に伝わる。荷重が伝わる各部位についての健全性を以下に評価する。



図(ロ)A-16 外容器における圧縮・積み重ねモデル

A.5.4.1 積み重ね時にスタッキングブラケットにかかる荷重

スタッキングブラケットは、積み重ね時に溶接部がせん断荷重を受ける。スタッキングブラケットの積み重ね応力モデルを図(ロ)A-17に示す。



図(ロ)A-17 スタッキングブラケットにおける積み重ね応力モデル

各スタッキングブラケットにかかる荷重は、

$$F = W_a/4 = \boxed{} \text{ N}$$

溶接部にかかるせん断応力は $\tau_{\text{weld}} = F/A$ で求められ、ここで、 F は加わった垂直もしくは水平荷重で、 A は溶接断面積である。溶接断面積は、以下の数式で求められる。

$$A = h \sin 45$$

ここで、 l は図(ロ)A-17 から、 $269.87 + 203.2 = 473.07$ mm、 h は溶接脚長 2.66 mm である。よって、

$$A = h \sin 45 = 889.79 \text{ mm}^2$$

溶接部にかかるせん断応力は以下の数式で求められる。

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

よって、

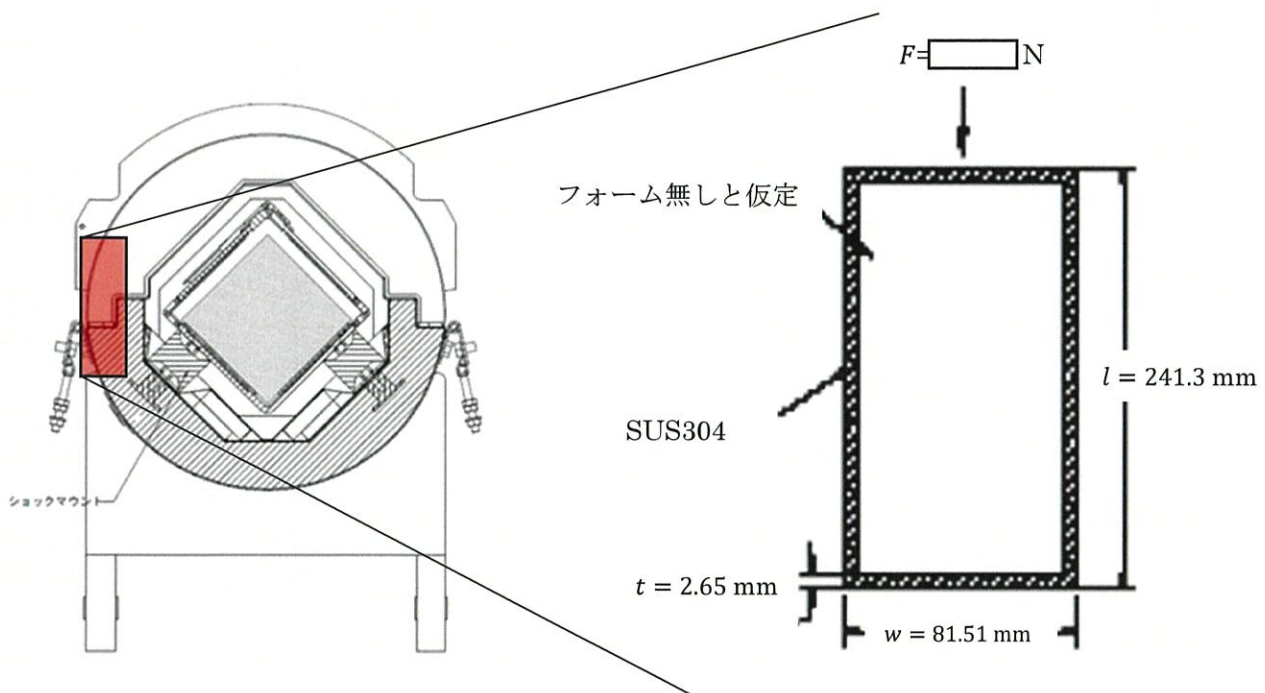
$$\tau = \boxed{} \text{ MPa}$$

となる。したがって許容溶接せん断応力の 71 MPa を下回り、安全率は以下の通りとなる。

$$\text{安全率} = \frac{71}{\boxed{}} = \boxed{}$$

A.5.4.2 積み重ね時に外容器にかかる荷重

輸送物の積み重ねにより、外容器に座屈が生じないかどうかを評価する。外容器に対する荷重は、スタッキングブラケットの着底部から加わり、脚上部まで伝わる。そこで、スタッキングブラケットの着底部から脚上部までの領域について図(ロ)A-18に示す通り、着底部から脚上部の長さ l (241.3 mm)、スタッキングブラケットの横幅 w 、(81.51mm)、板厚 t (2.65 mm) の長方形断面とみなし、当該長方形断面に対してスタッキングブラケットの溶接部から \square N の圧縮荷重が働いた場合、座屈が生じるかどうか評価を行う。なお、本モデルでは、保守的にフォームの存在は考慮しない。



図(ロ)A-18 外容器圧縮モデル

細長比 SR は以下の数式で求められる。

$$SR = l/k$$

ここで、 l は 241.3mm である。断面回転半径 k は以下の数式で求められる。

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

外容器部分について、外容器圧縮モデルの内法寸法はそれぞれ横幅 w_i 、長さ l_i とし、断面二次モーメント I 及び断面積 A は以下の通りとなる。

$$I = (wl^3 - w_i l_i^3)/12$$

ここで、

$$w = 81.51 \text{ mm}、w_i = 81.51 - 2 \times 2.65 = 76.21 \text{ mm}、$$

$$l = 241.3 \text{ mm}、l_i = 241.3 - 2 \times 2.65 = 236.00 \text{ mm}$$

よって

$$I = 1.195 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

$$A = (wl - w_i l_i)$$

$$A = 1,682.8 \text{ mm}^2$$

よって、 k の値は以下の通りとなる。

$$k = 84.26 \text{ mm}$$

以上より、細長比 SR は

$$SR = 2.87$$

となる。

次に、柱の限界細長比は以下の式で求められる。

長柱

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \sqrt{\frac{2\pi^2 CE}{\sigma_y}}$$

ここで端部条件 C を保守的に1と定め、 E のヤング率、 σ_y の引張降伏応力を代入し数字を当てはめると、

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = 139$$

短柱

$$\left(\frac{l}{k}\right)_2 = 0.282 \sqrt{\frac{AI^2}{\pi^2 I}}$$

$$\left(\frac{l}{k}\right)_2 = 0.257$$

となる。

0.257(短柱) $<$ 2.87(SR) $<$ 139(長柱)であるため、容器部分は中間柱に分類される。ジョンソンの公式により、この柱の座屈荷重は以下の通りとなる。

$$P_{cr} = A \left(\sigma_y - \left\{ \frac{\sigma_y l}{2\pi k} \right\}^2 \frac{1}{CE} \right)$$

$$P_{cr} = 3.465 \times 10^5 \text{ N}$$

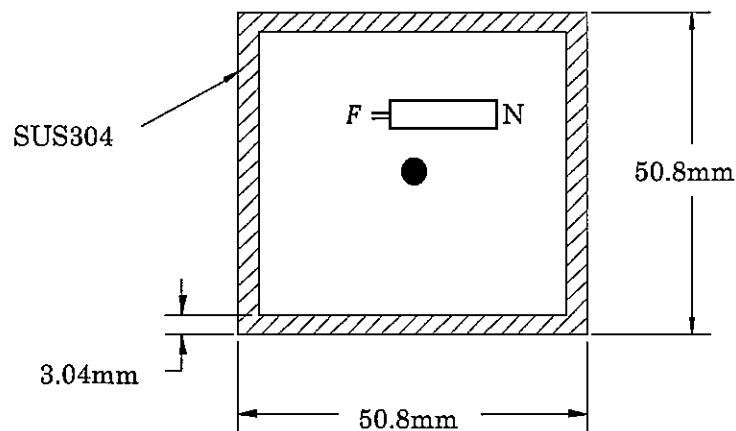
以上のことから、外容器に生じる荷重 N は、座屈荷重 $3.465 \times 10^5 \text{ N}$ よりも低く、安全率は以下の通りとなる。

$$\text{安全率} = \frac{3.465 \times 10^5}{\text{}} = \text{$$

A.5.4.3 積み重ね時に脚にかかる荷重

外容器の下側ケースに、SUS304 製の脚が 8 本取り付けられている。脚の断面形状を 図(ロ)A-19 に示す。脚の高さ(l)は 254 mm、脚の断面幅(w)は 50.8 mm である。また、脚 1 本あたりの荷重は N である。

脚の長さ=254mm



図(ロ)A-19 脚部圧縮モデル

本評価ではまず、座屈が生じているかどうかを評価するため、当該部分の細長比を考察する。細長比 SR は以下の数式で求められる。

$$SR = l/k$$

ここで、断面回転半径 k は以下の数式で求められる。

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

脚部圧縮モデルの内法寸法について、それぞれ横幅 w_i 、長さ l_i とし、断面二次モーメント I 及び断面積 A は以下の通りとなる。

$$I = (wl^3 - w_i l_i^3)/12$$

$$A = (wl - w_i l_i)$$

ここで、

$$w = 50.8 \text{ mm}、l = 254 \text{ mm}、w_i = 50.8 - 3.04 = 47.76 \text{ mm}、l_i = 254 \text{ mm}$$

よって

$$I = 4.151 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A = 772.16 \text{ mm}^2$$

k の値は以下の通りとなる。

$$k = 73.33 \text{ mm}$$

以上より細長比 SR は

$$SR = 3.5$$

となる。

次に、柱の限界細長比は以下の数式で求められる。

長柱

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \sqrt{\frac{2\pi^2 CE}{\sigma_y}}$$

ここで端部条件 C を保守的に1と定め、 E のヤング率、 σ_y の引張降伏応力を代入し数字を当てはめると、

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = 139$$

短柱

$$\left(\frac{l}{k}\right)_2 = 0.282 \sqrt{\frac{AI^2}{\pi^2 I}}$$

$$\left(\frac{l}{k}\right)_2 = 0.31$$

よって、 $0.31(\text{短柱}) < 3.5(SR) < 139(\text{長柱})$ となり、脚部は中間柱に分類される。よって、この柱の座屈荷重は以下の通りとなる。

$$P_{cr} = A \left(\sigma_y - \left\{ \frac{\sigma_y l}{2\pi k} \right\}^2 \frac{1}{CE} \right)$$

$$P_{cr} = \boxed{} \text{ N}$$

以上のことから、脚部に生じる荷重 13,387.5 N は、座屈荷重 $1.590 \times 10^5 \text{ N}$ よりも低く、安全率は以下の通りとなる。

$$\text{安全率} = \frac{1.590 \times 10^5}{\boxed{}} = \boxed{}$$

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、重量 6kg、直径 3.2cm の軟鋼棒が 1m の高さから輸送容器の外容器の外表面に落下した場合の、外板の貫通の有無を評価する。なお、外容器の外板はステンレス鋼製であり、板厚は 2.65mm である。

落下前の棒が持つポテンシャルエネルギー E_p は以下の通りである。

$$E_p = MGH = 5.89 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

M : 軟鋼棒の質量 6kg

G : 重力加速度 9.80665 m/s²

H : 落下高さ 1000mm

一方、軟鋼棒が外板を貫通するのに必要なエネルギー E_s は以下の通りである。

$$E_s = \frac{\pi}{2} \tau d t^2 = 1.05 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

τ : 外板の破壊せん断強さ 298MPa (引張強さ517 MPa/ $\sqrt{3}$)

d : 軟鋼棒の直径 32mm

t : 外板の板厚 2.65mm

ポテンシャルエネルギー E_p は、外板を貫通するのに必要なエネルギー E_s より小さく、安全率は以下の通りとなる。

$$\text{安全率} = \frac{1.05 \times 10^5}{5.89 \times 10^4} = 1.78$$

以上のことから、外板が軟鋼棒の落下によって貫通することはない。また、外板が貫通することがないことから、燃料集合体への影響もない。以上のことから本項目の場合にも基準に合致する。

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物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に、健全性

に影響を及ぼすような損傷は見られなかった。

これらの評価結果に基づき、一般の試験条件下における遮蔽評価では下記を考慮する。

- ・局所的に 25.4mm 変形したことを踏まえ、容器径方向における外容器外板の外形を 52mm (半径を 26mm) 縮めたモデルとする。

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 , ^{238}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の収納制限量は 1 体で kg- UO_2 以下である。

iii) 物理的形状

本輸送物の収納物の物理的形状は「(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ペレット又はガドリニア入り二酸化ウランペレットをジルカロイ-4 製又はジルコニウム合金製被覆管に挿入し、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 C996-96 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

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である燃料集合体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て評価をした結果、密封境界である燃料棒について、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.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。

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」に示すように、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内への水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、外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、外容器の局所的変形は臨界評価において影響を及ぼさない。

A.9.1.3 積み重ね試験及び貫通試験

積み重ね試験は、A.5.4 に示すように輸送物に発生する応力が許容応力の基準値を十分下回っている。6kg 棒貫通試験は A.5.5 に示すように、輸送物外板は貫通せず、1 辺 10 cm 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、積み重ね試験及び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.9.1.4 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-7に示す。一般の試験条件下では、輸送物構造部に1辺10 cm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-7 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
貫通	外表面に貫通なし 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

告示の別記第十二では、第一号（落下試験Ⅰ、落下試験Ⅱ、耐火試験及び0.9m浸漬試験）と第二号（15m浸漬試験）のうち最大の破損を受ける条件下に置くこととなっている。

本輸送容器は密封構造を持っていないため、浸漬試験中、すべての空間に水が充填されることになる。均圧により、これらの試験中、輸送容器の構造に負荷はかからない。したがって外容器が変形し、燃料棒間ギャップが変化する告示の別記第十二号第一号の条件下に輸送物を置くことが二号の条件下に置くことより厳しくなる。

本輸送物における落下試験は、以下の3つのユニット、計5体の原型容器を対象に実施した。

- ・試作品試験ユニット（Prototype-1、Prototype-2）
- ・認定試験ユニット（QTU-1、QTU-2）
- ・認証試験ユニット（CTU）

各ユニットに対する試験条件を表(ロ)A-8～表(ロ)A-12に示す。また、Prototype、QTU及びCTUを用いた試験結果の詳細を「(ロ)A 付属資料1」に示す。なお、一部ユニットの輸送物重量は設計最大総重量（kg）をわずかに下回っているが、落下試験高さが9mより高いため試験条件としては保守的になっている。輸送物重量と落下高さに関する検討結果を「(ロ)A 付属資料2」に示す。

本試験に供した原型容器内には、二酸化ウランペレットの重量を模擬するために鉛ペレットを挿入した模擬燃料集合体を装荷した。なお、模擬燃料集合体は収納物である集合体と設計が異なる型の長尺燃料集合体（燃料集合体）である。計5体の試験体における模擬燃料集合体の平均重量は約kgであった。模擬燃料集合体の詳細仕様は「(ロ)A 付属資料1」に示す。また、模擬燃料集合体と収納物の燃料集合体を比較検討し、模擬燃料集合体の保守性を説明した資料を「(ロ)A 付属資料3」に示す。

各ユニット間で外容器及びクラムシエルの基本的な構造に大きな違いはないが、各試験の結果を受けて少しずつ設計が変更されている。各試験体における設計変更点を以下に纏める。なお、すべてのユニットにおいて、クラムシエルの内面の中性子吸収材は、同等の機械特性をもつアルミニウム合金が採用されている。

(1) Prototype-1 から Prototype-2 への設計変更点

Prototype-1 の試験後、クラムシエルのトッププレート及びボトムプレートが外れていたため、以下が変更された。

- ・クラムシエルのトッププレート、ボトムプレートを固定するボルトの本数を増加

(2) Prototype-2 から QTU-1 への設計変更点

過剰な設計余裕の適正化や製造性向上のため、以下が変更された。

- ・外容器の外板及び内板の厚みを 3.04mm から 2.65mm に変更。
- ・ヒンジのボルトを直径 22.2mm から 19.1mm に変更。ボルトの本数も 2/3 に変更。
- ・外容器脚構造、上側ケース補強リング、スタッキングブラケット、フォークリフトポケットの構造を変更。
- ・L字型メインフレームの板厚を 9.5mm から 11.1mm に変更。
- ・ショックマウントの数を 22 から 14 に変更。

燃料集合体装荷作業を簡単化するため、以下を変更した。

- ・クラムシエルのドアのラッチを 90° 回転ナット (ラッチキーパー) に変更。
- ・クラムシエルの軸方向拘束システム (FTP のクランプ) を変更。

クラムシエル及び燃料集合体への衝撃軽減のため発泡ポリウレタン密度が変更された。

- ・外容器胴体部の発泡ポリウレタン密度を 11pcf から 10pcf に、外容器両端部を 16pcf から 14pcf に変更³。

(3) QTU-1 から QTU-2 への変更

QTU-1 から耐火性向上のため以下が変更された。

- ・外容器側面のヒンジについて、10 箇所 (片側 5 箇所) の不連続ヒンジから、8 箇所 (片側 4 箇所) の連続ヒンジに変更。
- ・0.455mm のステンレス鋼製シートを用いて中性子減速材を養生 (接着剤にて密封)。

(4) QTU-2 から CTU への変更

QTU-2 から耐火性向上のため以下が変更された。

- ・0.455mm のステンレス鋼製シートを用いて中性子減速材を養生 (溶接にて密封)。また、ショックマウント周辺の中性子減速材と金属カバーとの間に断熱材を追加。
- ・枕型構造体の外殻のステンレス鋼の厚みを 6.35mm に変更。
- ・枕型構造体の外殻と発泡ポリウレタンとの間の空隙に断熱材を充填し、耐熱性を向上。

³ ヤードポンド法表記の密度の単位、1pcf = 16.02kg/m³

- ・外容器側面の連続ヒンジについて、下部側の 76mm がカバーされていなかったため、側面全長をカバーするようヒンジ長さを変更。
- ・容器内への高温ガスの流入を減少させるため、下部枕型構造体のカバーの構造を変更。
- ・外容器の両端部から容器内部への熱流低減のため、外容器両端部の発泡ポリウレタンの密度を 14pcf から 20pcf に変更。
- ・シリコンゴムを難燃性のものに変更。

クラムシェル及び燃料集合体への衝撃軽減のため発泡ポリウレタン密度が変更された。

- ・枕型構造体の発泡ポリウレタン密度を 7pcf から 6pcf に変更。

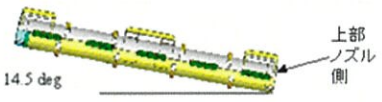
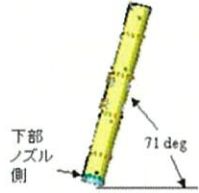
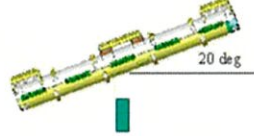
(5)CTU 試験後の最終設計変更点

CTU を対象に実施した落下試験及び耐火試験によって、性能に問題がないことは確認されたが、輸送容器の性能をより向上させるために、以下の設計変更を実施している。

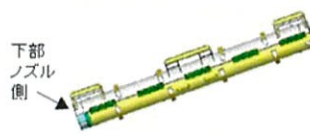

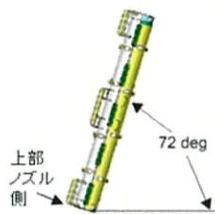
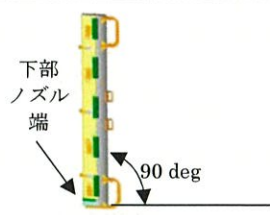
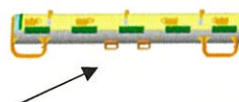

- ・外容器上側ケースにおける減速材ブロック取付けのためのリベット数を 1.5 倍に増加。
- ・外容器の下部ノズル側の内板と下部側枕型構造体が、垂直落下時に分離するよう内板に溝を追加。

以降の章にてこれらの試験結果、或いは解析結果を基に、輸送物の落下試験時の挙動、強度を説明する。

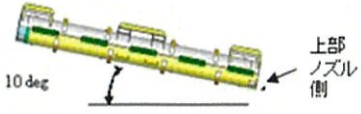


表(ロ)A-8 落下試験実施内容 (Prototype-1)

	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
Prototype-1	①	落下試験 I (落下高さ <input type="text"/> m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 14.5° 傾斜落下 ・ 上側ケースの上部ノズル側から落下 	
	②	落下試験 I (落下高さ <input type="text"/> m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 71° コーナー落下 ・ 側面の下部ノズル側から落下 	
	③	落下試験 II (落下高さ <input type="text"/> m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 20° 傾斜落下 ・ 上側ケースの上部ノズル側から落下 ・ ピンとの接触箇所は上側ケースの中央 	

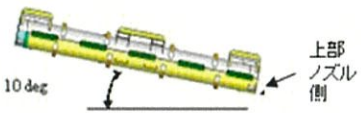
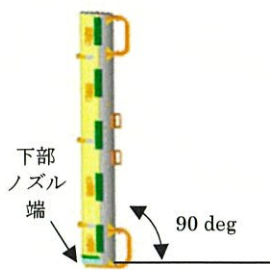
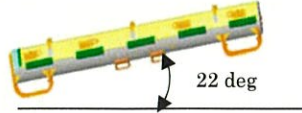
表(ロ)A-9 落下試験実施内容 (Prototype-2)

	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
Prototype-2	①	自由落下 (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 20° 傾斜落下 ・ 上側ケースの下部ノズル側から落下 	 <p>下部ノズル側</p>
	②	落下試験II (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 20° 傾斜落下 ・ 上側ケースの上部ノズル側から落下 ・ ピンとの接触箇所は上側ケースの中央 	 <p>上部ノズル側</p>
	③	落下試験I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 72° コーナー落下 ・ 上側ケースの上部ノズル側から落下 	 <p>上部ノズル側</p> <p>72 deg</p>
	④	落下試験I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 垂直落下 ・ 下部ノズル側から落下 	 <p>下部ノズル側</p> <p>90 deg</p>
	⑤	落下試験I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水平落下 ・ 下側ケース (脚部) 側から落下 	 <p>下部ケース (脚部)</p>
	⑥	落下試験I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水平落下 ・ 側面から落下 	 <p>側面</p>


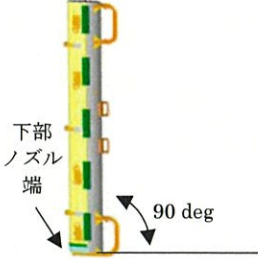
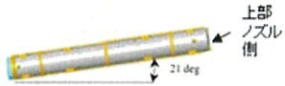
表(ロ)A-10 落下試験実施内容 (QTU-1)

	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
QTU-1	①	自由落下 (落下高さ 1.29m)	<ul style="list-style-type: none"> ・10° 傾斜落下 ・上部ノズル側から落下 	
	②	落下試験 I (落下高さ 10.15 m)	<ul style="list-style-type: none"> ・72° コーナー落下 ・上側ケース、上部ノズル側から落下 	
	③	落下試験 II (落下高さ 1.07m)	<ul style="list-style-type: none"> ・83° コーナー落下 ・上側ケース、上部ノズル側から落下 ・ピンとの接触箇所は外容器のヒンジ 近辺 	

表(ロ)A-11 落下試験実施内容 (QTU-2)

	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
QTU-2	①	自由落下 (落下高さ 1.27m)	<ul style="list-style-type: none"> ・10° 傾斜落下 ・上部ノズル側から落下 	
	②	落下試験 I (落下高さ 10.18m)	<ul style="list-style-type: none"> ・垂直落下 ・下部ノズル側から落下 	
	③	落下試験 II (落下高さ 1.07m)	<ul style="list-style-type: none"> ・22° 傾斜落下 ・下側ケース、下部ノズル側から落下 ・ピンとの接触箇所は下側ケースの 中央 	

表(ロ)A-12 落下試験実施内容 (CTU)

	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
CTU	①	自由落下 (落下高さ 1.27m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 9° 傾斜落下 ・ 上部ノズル側から落下 	
	②	落下試験 I (落下高さ 10.0m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 垂直落下 ・ 下部ノズル側から落下 	
	③	落下試験 II (落下高さ 1.07m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 21° 傾斜落下 ・ 側面、下部ノズル側から落下 ・ ピンとの接触箇所は側面の中央 	

A.9.2.1 強度試験・落下試験 I (9m 落下時)

A.9.2.1.1 垂直落下

垂直落下試験は Prototype-2、QTU-2、CTU の試験体に対し実施した。いずれも下部ノズル側から落下された。

(1) Prototype-2 試験④

Prototype-2 の垂直落下試験 (試験④) について容器内外部の確認結果を以下に示す。なお、Prototype-2 では複数回の 9m 落下試験が実施されており、容器の内部確認は試験⑥後に実施されたため、下記の結果は垂直落下以外の影響も含んでいる。

- ・外容器は局所的なものを除いて大きな変形はなく、形状は維持された。
- ・外容器は閉じたままでヒンジ・ボルトは破損しなかった。
- ・外容器の下部ノズル端 (一次衝撃面) が 41.3 mm 圧縮変形した。
- ・クラムシエルの底部は模擬燃料集合体との衝突により分離した。こちらは垂直落下前に実施した 9m 落下 (試験③) によって生じたクラムシエルと模擬燃料集合体の軸方向ギャップによって、落下時の衝撃が大きくなったことが原因であると考えられる。
- ・燃料棒に亀裂や破損は見られなかった。

(2) QTU-2 試験②

QTU-2 の垂直落下試験 (試験②) について、容器内外部の確認結果を以下に示す。

- ・外容器は局所的なものを除いて大きな変形はなく、形状は維持された。
- ・外容器は閉じたままでヒンジ・ボルトは破損しなかった。
- ・外容器の下部ノズル側端部から 177.8 mm の領域にしわが発生し、全長が mm 圧縮された。
- ・クラムシエルは変形、移動しなかった。
- ・中性子減速材及び中性子吸収材の位置は変化しなかった。
- ・下部ノズルから 304.8mm 付近で、燃料棒のギャップの拡大が確認された。集合体外寸法は 212.7 mm から最大 219.1 mm まで拡大した。
- ・燃料棒は上部ノズルと下部ノズルとの間に収まっていた。
- ・燃料棒に亀裂や破損は見られなかった。

(3)CTU 試験②

CTU の垂直落下試験（試験②）について、容器内外部の確認結果を以下に示す。

- ・外容器は局所的なものを除いて大きな変形はなく、形状を維持した。
- ・外容器は閉じたままでヒンジボルトは破損しなかった。
- ・輸送容器端から 228.6 mm（下側ケース）、304.8 mm（上側ケース）の位置にしわが生じた。このしわにより輸送容器全長は 12.7 mm 減少した。
- ・クラムシェルは変形、移動しなかった。
- ・中性子減速材及び中性子吸収材の位置は変化しなかった。
- ・下部ノズルから 508mm 付近まで、燃料棒のギャップの拡大が確認された。集合体外寸法は 212.7 mm から最大 228.6 mm まで拡大した。
- ・燃料棒の軸方向位置は上下部ノズルの間に収まっていた。
- ・燃料棒 20 本については、下部端栓溶接部で亀裂が確認された。亀裂幅は最大 1.91 mm、亀裂長さは最大 mm であった。ペレットが燃料棒の外に放出された棒はなかった。

A.9.2.1.2 水平落下

水平落下は Prototype-2 の試験体に対し実施した。

(1)Prototype-2 試験⑤、⑥

落下条件は、下側ケース（脚部）側からの水平落下試験（試験⑤）と側面からの水平落下試験（試験⑥）であった。

- ・下側ケース側からの水平落下試験により、脚部やフォークリフトポケットは大きく変形したが外容器の胴体部はほとんど変形しなかった。
- ・側面からの水平落下試験により、ヒンジが衝突面となったが、ヒンジ及びヒンジボルトは破損せず、外容器はほとんど変形しなかった。
- ・容器内部の確認結果は A.9.2.1.1(1)と共通である。

A.9.2.1.3 コーナー落下

コーナー落下は Prototype-1、Prototype-2、QTU-1 の試験体に対し実施した。

(1)Prototype-1 試験②

Prototype-1 のコーナー落下試験（試験②）は、落下角度は 71° 、衝突面は上部ノズル側の外容器側面の条件で実施した。なお、本コーナー落下試験前に傾斜落下試験を実施したため、その影響も含んだ結果となっている。

- ・外容器は局所的なものを除いて大きな変形はなく、形状は維持された。
- ・外容器下側ケースの上部ノズル側のヒンジボルトが 1 本破損したが、外容器は閉じたままであった。
- ・下部ノズル側（一次衝撃面）の外容器の変形量は幅 254.0 mm、長さ 558.8 mm、深さ 76.2mm であった。
- ・上部ノズル側（二次衝撃面）の外容器の変形量は幅 152.4 mm、長さ 330.2 mm、深さ 6.4 mm であった。
- ・クラムシエルの扉は閉じたままであったが、トッププレート及びボトムプレートがクラムシエルから分離した。
- ・中性子減速材及び中性子吸収材の位置は変化しなかった。
- ・燃料棒の軸方向位置は上下部ノズルの間に収まっていた。
- ・燃料集合体外寸法は、試験①後の 209.6 mm から最小 206.6 mm まで圧縮した。
- ・燃料棒に亀裂や破損は見られなかった。

(2)Prototype-2 試験③

Prototype-2 のコーナー落下試験（試験③）は、落下角度は 72° 、衝突面は上側ケースの上部ノズル側の条件で実施した。

- ・外容器は局所的なものを除いて大きな変形はなく、形状は維持された。
- ・衝突面付近で、上側ケースと下側ケースの間に最大 25.4 mm のギャップが生じたものの、外容器の扉は閉じたままであり、ヒンジボルトは破損しなかった。
- ・上部ノズル側の上側ケースについて、衝突面から軸方向 228.6 mm までの領域にしわが生じた。上側ケースは最大 mm 圧縮した。
- ・クラムシェルに大きな変形はなかった。トッププレートについてはわずかな曲がりは見られたものの、外れなかった。
- ・中性子減速材及び中性子吸収材の位置は変化しなかった。
- ・燃料棒の一部は最大約 25.4 mm 上部ノズル側に移動したが、中性子吸収材が存在する領域に収まっていた。
- ・燃料棒に亀裂や破損は見られなかった。

(3)QTU-1 試験②

QTU-1 のコーナー落下試験（試験②）は、落下角度は 72° 、衝突面は上側ケースの上部ノズル側の条件で実施した。

- ・外容器は局所的なものを除いて大きな変形はなく、形状は維持された。
- ・外容器は閉じたままでヒンジボルトは破損しなかった。
- ・衝突面付近の上側ケース、下側ケースの継ぎ目に小さな裂け目が生じた。
- ・上部ノズル側は、上側ケース全面が変形した。上側ケースは最大 88.9 mm 圧縮した。
- ・クラムシェルは変形、移動しなかった。
- ・中性子減速材及び中性子吸収材の位置は変化しなかった。
- ・上部ノズル周辺については、集合体外寸法は 212.7 mm から最大 219.1 mm まで拡大した。
- ・燃料棒の軸方向位置は上下部ノズルの間に収まっていた。
- ・燃料棒に亀裂や破損は見られなかった。

A.9.2.1.4 傾斜落下

傾斜落下は Prototype-1 の試験体に対して実施した。

(1) Prototype-1 試験①

Prototype-1 の傾斜落下試験（試験①）は、落下角度は 14.5° 、衝突面は上側ケースの上部ノズル側であった。

- ・外容器は局所的なものを除いて大きな変形はなく、形状は維持された。
- ・外容器は閉じたままでヒンジボルトは破損しなかった。
- ・上部ノズル側（一次衝撃面）の外容器の変形量は、幅 304.8 mm、長さ 228.6 mm、深さ 38.1mm であった。
- ・下部ノズル側（二次衝撃面）の外容器の変形量は、幅 292.1 mm、長さが軸方向に輸送容器端部から補強リングのエッジまで、深さ 19.1 mm であった。
- ・一次衝撃面、二次衝撃面以外の外容器胴体部分は、補強リングのガードにより殆ど変形しなかった。
- ・クラムシエルの扉は閉じたままであったが、下部ノズル側が 6.4 mm 外側に膨らんでいた。
- ・中性子減速材及び中性子吸収材の位置は変化しなかった。
- ・燃料棒の軸方向位置は上下部ノズルの間に収まっていた。
- ・燃料棒に亀裂や破損は見られなかった。

A.9.2.1.5 落下試験 I の結果の要約

(1) 外容器の損傷状況

- ・コーナー落下、水平落下、傾斜落下では、変形は外容器端部の衝撃面局所と外容器上面の補強リング、外容器下面の脚に限られた。
- ・垂直落下において、外容器の胴体部分が最大 50.8mm 圧縮変形した。
- ・ヒンジは破損せず、ヒンジボルトも Prototype-1 の 1 本が破損したのみと殆ど発生しなかった。そのため、容器の上側ケースと下側ケースが分離することはない、内容物が容器外に飛び出すことはなかった。

表(ロ)A-13 落下試験 I 変形量

	姿勢	衝突面	変形量
Prototype-1	14.5° 傾斜落下	上部ノズル側の上側ケース	幅 304.8mm、長さ 228.6mm、深さ 38.1mm
	71° コーナー落下	下部ノズル側の容器側面	幅 254.0mm、長さ 558.8mm、深さ 76.2mm
Prototype-2	72° コーナー落下	上部ノズル側の上側ケース	上側ケースが最大 <input type="text"/> mm 圧縮
	垂直落下	下部ノズル側	容器全長が 41.3mm 圧縮
	水平落下	脚部	大きな変形なし
	水平落下	容器側面	
QTU-1	72° コーナー落下	上部ノズル側の上側ケース	上側ケースが最大 88.9mm 圧縮
QTU-2	垂直落下	下部ノズル側	容器全長が <input type="text"/> mm 圧縮
CTU	垂直落下	下部ノズル側	容器全長が 12.7 mm 圧縮

(2) 輸送容器内部の損傷状況

- ・Prototype の結果を受けてクラムシェルの設計変更が行われたが、QTU-1、QTU-2及びCTU のクラムシェルには、落下によって変形、移動は生じず、トッププレート、ボトムプレートは外れなかった。
- ・中性子減速材と中性子吸収材は所定の位置から移動しなかった。
- ・落下により模擬燃料集合体は変形し、下端から長さ 508mm にわたって、燃料集合体外寸法の拡大が確認された。
- ・燃料棒の一部は破損した。ただし、その亀裂は小さく、ペレットが燃料棒外に飛び出すことはなかった。
- ・燃料棒の軸方向への移動範囲は、中性子吸収材が存在する領域に留まった。

(3) NFI 製燃料集合体に対する健全性について

CTU 垂直落下時に生じた燃料棒亀裂が NFI 製燃料集合体に対しても生じるかどうかを考察した（「(ロ)A 付属資料 3」参照）。模擬燃料集合体と収納物である NFI 製燃料集合体の構造、材料の比較、CTU に対する落下試験時に燃料棒下部端栓部に発生した亀裂の発生メカニズムの考察及び NFI 製燃料集合体の単体落下試験の結果から、設計が模擬燃料集合体と異なるため、収納物である NFI 製燃料集合体を輸送容器に収納して落下させた場合は、燃料棒に破損、亀裂は発生しないことがわかった。

また、水平、傾斜落下時における NFI 製燃料集合体への影響を考察した (I(ロ)A 付属資料 4) 参照)。Prototype1,2 に対して実施された水平及び傾斜落下の結果からは、燃料棒に亀裂、破損はなく、その兆候となるような変形等も認められなかった。その上、過去に実施した NFI 製燃料棒に対する試験結果から、NFI 製燃料棒の圧縮及び曲げ耐性を確認したところ、水平、傾斜落下させた場合に生じる圧縮荷重や燃料棒曲がりによって、燃料棒に亀裂が生じたり、破損するおそれはないことがわかった。

A.9.2.1.6 落下試験 I による臨界解析への影響

最終的に設計された本輸送容器に対して、特別の試験条件 I の各落下姿勢で受ける臨界性能への影響をまとめると以下の通りである。

- (i) 燃料棒に破損、亀裂は発生しない。ただし、臨界解析においては保守的に燃料棒内に浸水させたモデルとする。
- (ii) 燃料集合体を収納するクラムシェルは変形、移動しない。
- (iii) 中性子減速材と中性子吸収材は所定の位置から移動しない。
- (iv) 容器の上側ケースと下側ケースは外れず、開かない。したが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発生し、燃料集合体外寸法が下端から 508mm にわたり拡大したことを臨界モデルに考慮する。
- (vi) 外容器の変形は垂直落下において、軸方向が最大 mm 圧縮変形することが確認された。コーナー落下、水平落下、傾斜落下では、変形は外容器端部の衝撃面局所と外容器上面の補強リング、外容器下面の脚に限られたことから、容器の径方向については臨界解析に影響する変形はない。以上のことから、垂直落下の変形量 mm を考慮し mm 軸方向に圧縮変形させたモデルとする。
- (vii) 燃料集合体はクラムシェルから飛び出すことはなく、燃料棒の軸方向の移動範囲は、中性子吸収材が存在する領域に留まる。

A.9.2.2 強度試験・落下試験 II (1 m ターゲット落下)

落下試験 II は Prototype-1、Prototype-2、QTU-1、QTU-2、CTU の試験体に対し実施した。試験結果の詳細は「(ロ)A 付属資料 1」に示す。

ターゲットは、上面が滑らかな水平で直径が cm の を落下試験台に垂直に溶接したものである。長さは約 であり外容器を貫通した場合に十分内部に到達できるもの

である。ターゲットの詳細は「(ロ)A 付属資料 1」を参照。

(1) Prototype-1 試験③

Prototype-1 の 1m ターゲット落下 (試験③) では、上側ケースの中央部をターゲットにして 20° の角度で傾斜落下させた

ターゲットとの接触部が、幅 266.7 mm、深さ 41.4 mm 変形したものの、外板は貫通しなかった。外容器上側ケースの内部の検査において、内板に幅 381.0mm、深さ 12.7 mm の変形が確認されたが、減速材ブロックは損傷しなかった。

(2) Prototype-2 試験②

Prototype-2 の 1m ターゲット落下 (試験②) では、上側ケースの中央部をターゲットにして 20° の角度で傾斜落下させた。

ターゲットとの接触部が、幅 355.6mm、長さ 254.0mm、深さ 50.8 mm 変形したものの、外板は貫通しなかった。外容器上側ケースの内部の検査において、内板に幅 609.6 mm、深さ 15.9 mm の変形が確認されたが、減速材ブロックは損傷しなかった。

(3) QTU-1 試験③

QTU-1 の 1m ターゲット落下 (試験③) では、上側ケースの上部ノズル側をターゲットにして 83° の角度でコーナー落下させた。

ターゲットとの接触部が、幅 152.4mm、深さ 38.1mm 変形したものの外板は貫通しなかった。なお、本 1m ターゲット落下前に、9m コーナー落下を実施しており、本 1m ターゲット落下の衝突面は 9m コーナー落下の衝突面と同じ場所である。1m ターゲット試験前の時点で、上側ケース、下側ケースの継ぎ目に小さな裂け目が生じていたが、本試験により裂け目が 28.6 mm に拡大した。また、内部に大きな損傷は認められず、減速材ブロック及び中性子吸収材の位置は変化なかった。

(4) QTU-2 試験③

QTU-2 の 1m ターゲット落下 (試験③) では、下側ケースの中央部をターゲットにして 22° の角度で傾斜落下させた。

ターゲットとの接触箇所が、幅 152.4mm、長さ 228.6mm、深さ 73.1mm 変形したものの、外板は貫通しなかった。また、内部に大きな損傷は認められず、減速材ブロッ

ク及び中性子吸収材の位置は変化なかった。

(5) CTU

CTUの1mターゲット落下では、容器側面の中央部をターゲットにして21°の角度で傾斜落下させた。

ターゲットとの接触箇所が幅152.4mm、深さ34.9mm変形したものの、外板は貫通せず、ヒンジ及びヒンジボルトは破損しなかった。また、内部に大きな損傷は認められず、減速材ブロック及び中性子吸収材の位置は変化しなかった。

A.9.2.2.1 落下試験Ⅱの結果の要約

試験時の変形量を表(ロ)A-14に示す。落下試験Ⅱを実施した5ケースの試験ではいずれも、外表面の亀裂、開口は生じず、ヒンジ部をターゲットにした場合でも、ヒンジ、ボルトの破断は生じなかった。

A.9.2.2.2 落下試験Ⅱによる臨界解析への影響

落下試験Ⅱでは、外容器外表面に凹みが生じたが、貫通や外表面の亀裂、開口は生じなかった。外容器内部には本試験の影響による損傷はなく、クラムシェル及び収納物に与える影響もない。以上のことから、臨界解析に与える影響は「A.9.2.1 強度試験・落下試験Ⅰ(9m落下時)」に包含される。

表(ロ)A-14 落下試験Ⅱ変形量

	姿勢	箇所	変形量 (外板)
Prototype-1	20° 傾斜落下	容器中央	幅 266.7 mm、深さ 41.4 mm
Prototype-2	20° 傾斜落下	容器中央	幅 355.6mm、長さ 254.0mm、深さ 50.8 mm
QTU-1	83° コーナー落下	上部ノズル	幅 152.4mm、深さ 38.1mm
QTU-2	22° 傾斜落下	容器中央	幅 152.4mm、長さ 228.6mm、深さ 73.1mm
CTU	21° 傾斜落下	容器中央	幅 152.4 mm、深さ 34.9 mm

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変形は生じない。

A.9.2.4 浸漬

臨界安全解析は輸送容器内部への水の浸入を考慮に入れているため、規則に基づく 0.9m の水頭下の浸漬試験は実施していない。

A.9.2.5 特別の試験条件まとめ

本輸送容器は自由落下、貫通試験、及び耐火試験の累積損傷に十分に耐える。したがって本輸送容器は規則の要求を十分に満たしている。

試験の結果、落下試験 I 及び II では複数姿勢の落下試験を実施した。結果落下試験による外容器への影響は局所的な変形にとどまり、クラムシェルが外部に露呈することはない。

クラムシェル内部に有意な損傷はなく、外容器内にて所定の位置から動くこともなかった。クラムシェルの中性子吸収材、中性子減速材にも有意な損傷はなく、所定の位置から動くこともなかった。収納物である燃料集合体は初期の形状・機能を維持しており、燃料棒にウランペレットが漏出可能な開口は発生しなかった。

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-15に示す。

表(ロ)A-15 構造解析結果 (1/3)

条件	項目	解析基準	解析基準値	解析結果	安全率
通	1 化学的及び電気的反応 (1)化学的反応 (2)電気的反応	化学反応性 異種材質間の電位差	化学反応性 無 電位差 無	無 無	— —
	2 低温強度 (1)外容器 (2)クラムシェル	低温強度 低温強度	強度低下 無 強度低下 無	無 無	— —
輸送	4 吊上装置 (1)スタッキングブランチ吊り上げ孔 (2)スタッキングブランチ溶接部	せん断応力 せん断応力	118 MPa 71 MPa	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/> <input type="text"/>
	5 圧力 (1)燃料棒 (2)燃料棒溶接部	許容引張応力 溶接部許容引張応力	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/> <input type="text"/>
時	7 振動	輸送中の振動	亀裂、破損の有無	無	—

表(ロ)A-15 構造解析結果 (2/3)

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 熱的応力 (1)燃料棒 (2)燃料棒溶接部	引張応力 引張応力	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> MPa	<input type="text"/>
	2 水噴霧	材質劣化 内部浸水	材質劣化が無いこと 内部浸水が無いこと	材質劣化無し 内部浸水無し	—
	3 自由落下	変形量	—	局部的変形	—
	4 積み重ね (1)スタッキングブ ラケット溶接部 (2)外容器 (3)脚部	せん断応力 座屈荷重 座屈荷重	71MPa $3.478 \times 10^5 \text{ N}$ $1.590 \times 10^5 \text{ N}$	<input type="text"/> MPa <input type="text"/> N <input type="text"/> N	<input type="text"/>
	5 貫通 外容器	$E_s = \frac{\pi}{2} \tau d t^2$	$1.05 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$	$5.89 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$	1.78

表(ロ)A- 15 構造解析結果 (3/3)

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 (1)収納物 (2)外容器 (3)中性子吸収材 (4)中性子減速材	健全性 変形量 健全性 健全性	— — — —	健全 局部的変形 健全 健全	— — — —
	2 落下試験 II (1)収納物 (2)ケース (3)中性子吸収材 (4)中性子減速材	健全性 変形量 健全性 健全性	— — — —	燃料棒に 影響なし 局部的変形 健全 健全	— — — —
	3 耐火試験	変形、破損 収納物の健全性	変形量 破損状況	変形なし	—
				著しい劣化 や変形なし	—
			燃料棒に破 損無し	—	
4 浸漬試験	—	—	臨界解析で 浸水を考慮	—	

付属資料

- 1) (口)A 付属資料 1 落下試験結果報告書
- 2) (口)A 付属資料 2 落下試験における試験体重量に係る検討
- 3) (口)A 付属資料 3 垂直落下時における燃料健全性に係る検討
- 4) (口)A 付属資料 4 水平落下時における燃料健全性に係る検討
- 5) (口)A 付属資料 5 9m 垂直落下時における加速度に係る検討
- 6) (口)A 付属資料 6 固有振動数導出に係る補足説明資料

(口)A 付属資料 1

落下試験結果報告書

1. はじめに

Traveller XL 型輸送容器の原型容器落下試験の結果について示す。原型容器 5 基を対象に A 型輸送物に要求される一般の試験条件下での自由落下試験(1.2m)、核分裂性輸送物に要求される特別の試験条件下での 9m 落下試験及び 1m ターゲット試験を実施した。

2. 輸送容器の概要

(1) 輸送容器の名称 Traveller XL 型

(2) 輸送容器の種類 A 型核分裂性輸送物

(3) 最大濃縮度 wt%

(4) 収納物 燃料集合体 1 体

(5) 装荷制限 kg-UO₂ 以下

(6) 寸法 L : 5,740 mm

W : 688 mm

H : 998 mm

(7) 重量

・ 輸送容器の総重量 1,476kg 以下

・ 輸送物の総重量 kg 以下

(8) 主要材料

・ 外容器 ステンレス鋼、発泡ポリウレタン

・ クラムシエル アルミニウム合金

・ 中性子吸収材 BORAL®

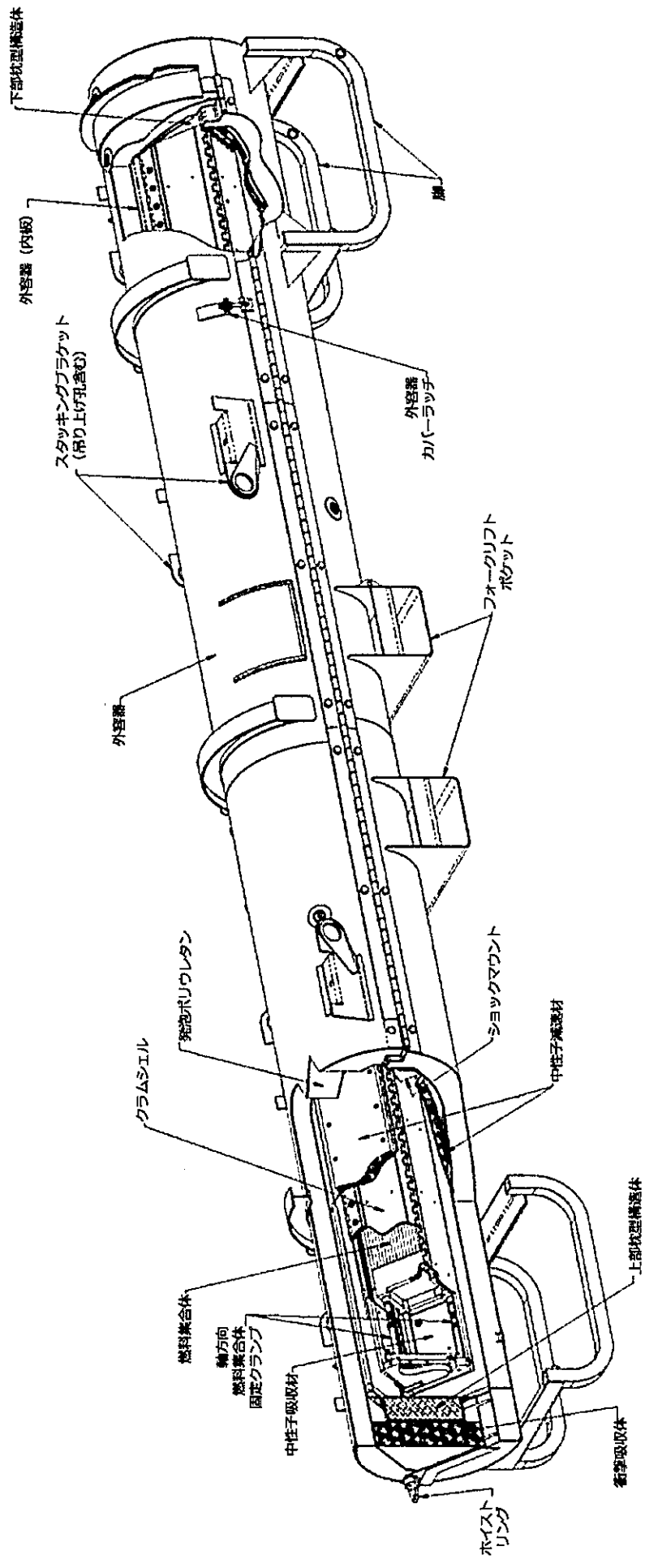
・ 中性子減速材 超高分子量ポリエチレン

・ ボルト、ヒンジ ステンレス鋼

(9) 概要

本輸送物の全体図を図(ロ)A付 1-1 に示す。本輸送容器は、外容器及びクラムシェルと呼ばれる保護容器から構成される。外容器は、ステンレス鋼製の二重壁構造であり、落下時の衝撃及び火災時の熱の流入を緩和するため二重壁内に発泡ポリウレタンが充填されている。また、外容器の両端部には、落下時の衝撃を吸収するため衝撃吸収体及び枕型構造体が備わっている。外容器の上側ケースと下側ケースについては、ヒンジ及びボルトが側面両側を固定する構造となっている。

クラムシェルは、アルミニウム合金製板からなる箱型構造となっており、収納物の通常の取り扱い時の損傷を防止するとともに、輸送事故時の際の収納物の変形を制限する。クラムシェルは、ヒンジ及びラッチによって扉を固定する構造となっている。また、中性子吸収材である BORAL®製板は、クラムシェル内側の全面に配置している。



図(ロ)A 付 1-1 Traveller XL 型輸送容器の概略図

3. 試験

3.1. 原型容器

Traveller XL 型輸送物の原型試験は試作試験ユニット (Prototype)、認定試験ユニット (QTU)、認証試験ユニット (CTU) の3段階で試験が実施され、計5体の原型容器が使用された。

- ・試作品試験ユニット (Prototype-1、Prototype-2)
- ・認定試験ユニット (QTU-1、QTU-2)
- ・認証試験ユニット (CTU)

各原型容器の外容器及びクラムシェルの基本的な構造はすべての落下試験を通じて同一であるが、試験結果を受けて一部設計変更が行われている。設計変更点は「(ロ)A.9.2」に纏めている。

3.2. 代替収納物

いずれの試験についても、模擬燃料集合体を用いて試験が実施された。模擬燃料集合体の仕様を以下に示す。また、模擬燃料集合体の形状を図(ロ)A付1-2に示す。なお、P-グリッドは Prototype1, Prototype2 にのみ存在し、QTU1, QTU2 及び CTU は図(ロ)A付1-2 から P-グリッドを除いた設計の模擬燃料集合体が落下試験に供された。

型式： 型の 長尺燃料集合体
全長： mm
重量： kg (5つの模擬燃料集合体重量の平均値)

材質

- ①被覆管：
- ②中間支持格子：
- ③最上部支持格子：
- ④最下部支持格子：
- ⑤P-グリッド
- ⑥上部ノズル：
- ⑥下部ノズル：
- ⑦模擬ペレット：



図(ロ)A 付 1-2 模擬燃料集合体構造図

※1 実際の落下試験に用いられた模擬燃料集合体には制御棒集合体は挿入されていないが、本図面では挿入された状態を描画している。

※2

3.3. 試験実施場所及び試験実施日時

(1)試験実施場所

落下試験はいずれも米国オハイオ州コロンビアナにある Columbiana High Tech Company (CHT) にて実施された。

(2)試験実施日時

Prototype1 : 2003 年 1 月 27 日～28 日

Prototype2 : 2003 年 1 月 30 日

QTU-1 : 2003 年 9 月 11 日

QTU-2 : 2003 年 9 月 11 日

CTU : 2004 年 2 月 5 日

3.4. 落下試験体系

(1)落下試験台

--

(2)1m ターゲット試験用ターゲット

--

3.5. Prototype-1 に対する試験

3.5.1. 試験条件

Prototype-1 に対して、落下試験 I を 2 回と落下試験 II を 1 回実施した。落下試験条件を表(ロ)A 付 1-1 に、Prototype-1 の重量を表(ロ)A 付 1-2 に示す。また、輸送試験実施前の外観を写真(ロ)A 付 1-1 に、容器内部を写真(ロ)A 付 1-2 に示す。

3.5.2. 試験結果

3.5.2.1. 試験①後

試験①後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-3 に、輸送容器内部の状況を写真(ロ)A 付 1-4 に示す。写真(ロ)A 付 1-3 に示すように、局所的な変形を除き、容器の基本的な構造は損なわれなかった。落下試験による変形箇所は、輸送容器の上部ノズル側端部（一次衝撃面）、補強リング及び輸送容器の下部ノズル側端部（二次衝撃面）であった。

上部ノズル側は、幅 304.8 mm、長さ 228.6 mm、深さ 38.1 mm の変形が認められた。下部ノズル側は、292.1 mm、長さは軸方向に輸送容器端部から補強リングのエッジまで、深さ 19.1 mm の変形が確認され、エンドキャップ上部に小さな裂け目が発生した。

外容器のヒンジボルトは破損せず、外容器は閉じたままであった。

写真(ロ)A 付 1-4 に示すように、内部に大きな損傷は認められなかった。減速材ブロック及び中性子吸収材の位置は変化なかった。クラムシエルのドアは閉じたままであったが、下部ノズル側が最大 6.4 mm 膨らんでいた。

模擬燃料集合体を検査したところ、燃料棒に亀裂や破損のないことが確認された。また、燃料棒の軸方向位置が下部ノズルと上部ノズルとの間に収まっていることが確認された。燃料集合体外寸法は、213.8 mm から最小 209.6 mm まで減少し、燃料棒ギャップは 3.1 mm から局所的に最大 4.8 mm に広がった。

3.5.2.2. 試験②後

試験②後の輸送容器外観を写真(ロ)A付1-5に、輸送容器内部の状況を写真(ロ)A付1-6に示す。試験②後についても局所的な変形を除き、容器の基本的な構造は損なわれなかった。

落下試験による変形箇所は、輸送容器の下部ノズル側端部（一次衝撃面）、輸送容器の上部ノズル側端部（二次衝撃面）であった。

下部ノズル側は、幅 254.0 mm、長さ 558.8 mm、深さ 76.2 mm の変形が認められた。また、エンドキャップ上部に幅 203.2 mm の亀裂が発生した。落下の衝撃によって、スタッキングブラケットと外容器の接合部に局所的な座屈を引き起こし、小さなしわが発生した。

上部ノズル側には、スタッキングブラケットの周辺で、幅 152.4 mm、長さ 330.2 mm、深さ 6.4 mm の変形が認められた。スタッキングブラケットが外容器に垂直方向の衝撃を与え、外容器の長さ方向に荷重をより均一に分散させたことによって、変形量が比較的小さくなったと考えられる。

外容器は閉じたままであったが、写真(ロ)A付1-5に示すように、外容器のヒンジボルトが1本破損していることが確認された。

輸送容器内部の損傷は試験①後と比較して大きくなった。減速材ブロック及び中性子吸収材の位置は変化なかった。写真(ロ)A付1-6に示すように、クラムシエルのドアは閉じたままであったが、ボルトのせん断破壊によりトッププレートとボトムプレートはクラムシエルから分離した。

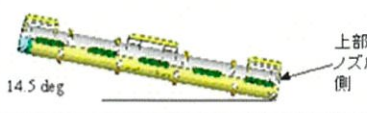
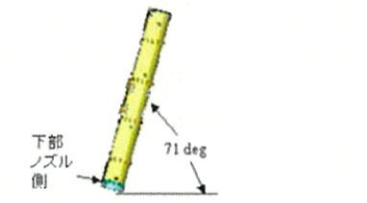
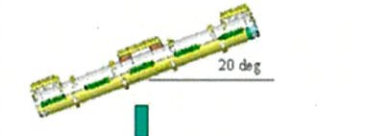
模擬燃料集合体を検査したところ、燃料棒に亀裂や破損のないことが確認された。また、燃料棒の軸方向位置が下部ノズルと上部ノズルとの間に収まっていることが確認された。

燃料集合体外寸法は、試験①後の 209.6 mm から最小 206.5 mm まで圧縮され、燃料棒ギャップは、局所的に 4.8 mm から最大 15.9 mm まで増加した。燃料棒ギャップの拡大は、第1～4グリッドにて確認され、第2グリッドについては、溶接部が引き裂かれ破損していた。

3.5.2.3. 試験③後

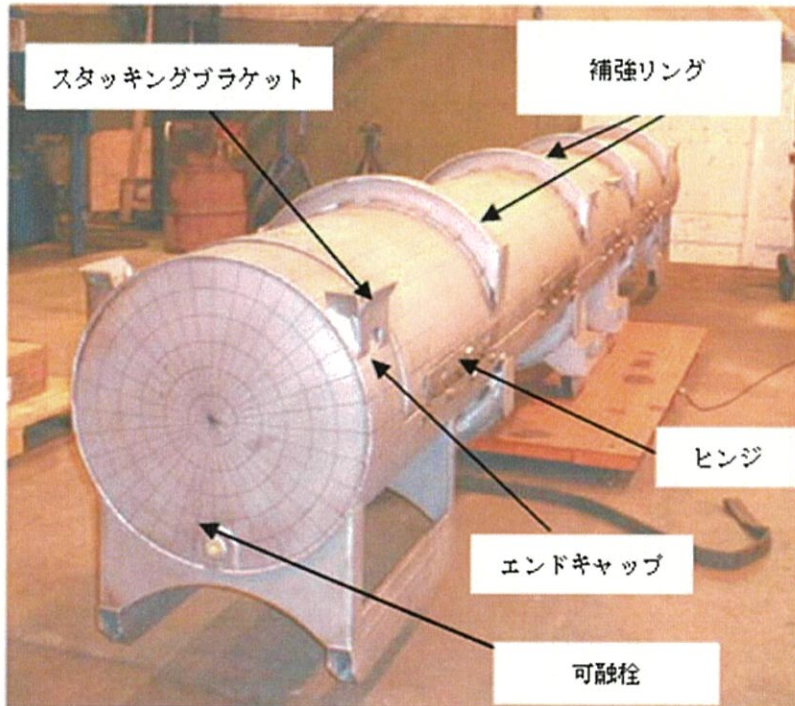
試験③後の輸送容器内外部の状況を写真(ロ)A 付 1- 7 に示す。ターゲットとの接触部が、幅 266.7 mm、深さ 41.4 mm 変形したものの、外板は貫通しなかった。外容器上側ケースの内部の検査において、内板に幅 381 mm、深さ 12.7 mm の変形が確認されたが、減速材ブロックは損傷しなかった。

表(ロ)A付 1-1 落下試験実施内容 (Prototype1)

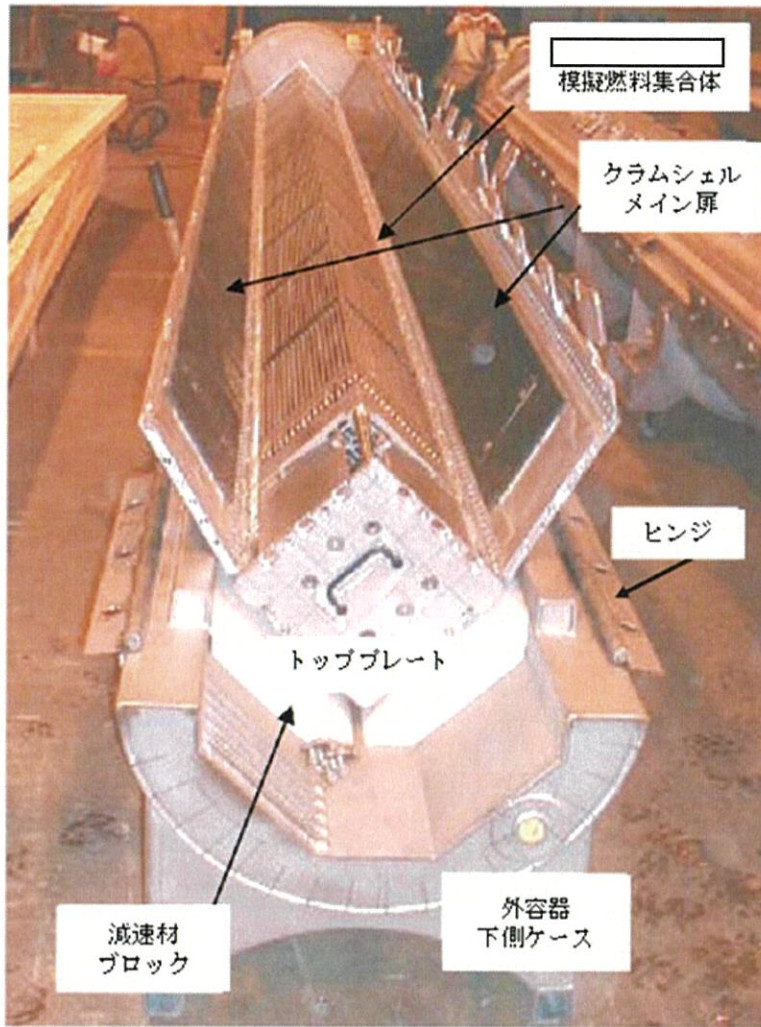
	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
Prototype-1	①	落下試験 I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 14.5° 傾斜落下 ・ 上側ケースの上部ノズル側から落下 	
	②	落下試験 I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 71° コーナー落下 ・ 側面の下部ノズル側から落下 	
	③	落下試験 II (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 20° 傾斜落下 ・ 上側ケースの上部ノズル側から落下 ・ ピンとの接触箇所は上側ケースの中央 	

表(ロ)A付 1-2 Prototype-1 の重量内訳

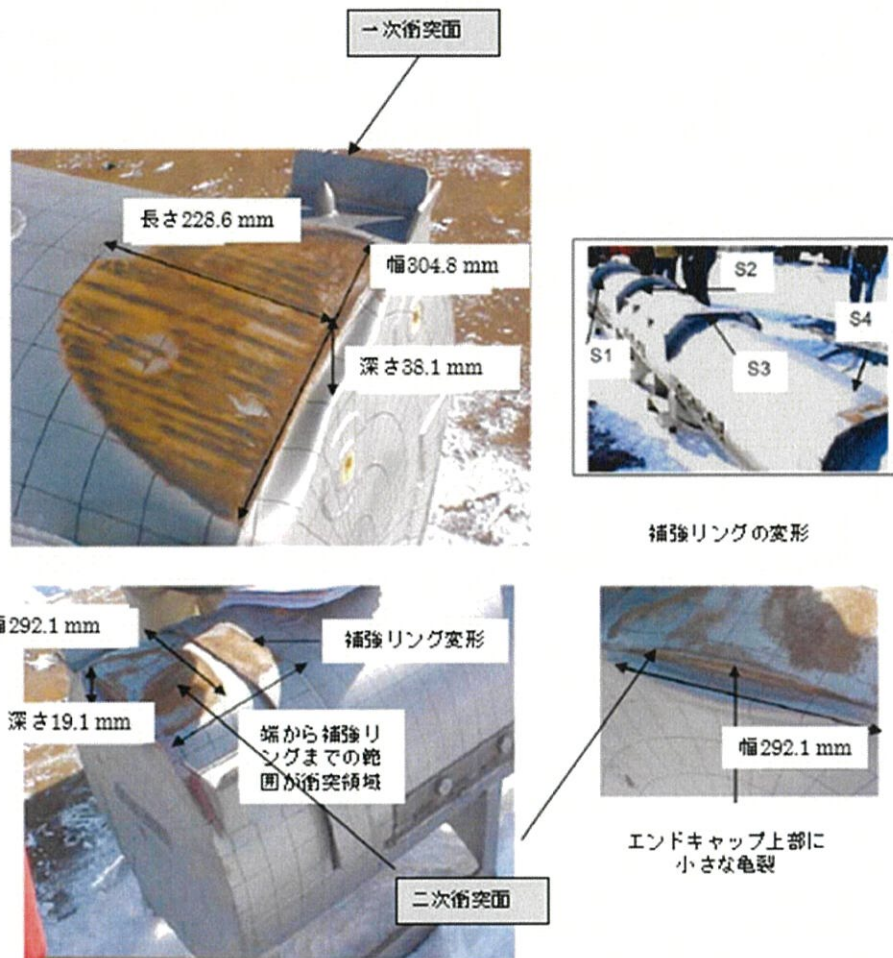
	重量
外容器重量	□
クラムシェル重量	
模擬燃料集合体重量	
総重量	2,301 kg



写真(ロ)A 付 1- 1 Prototype-1 輸送容器外観



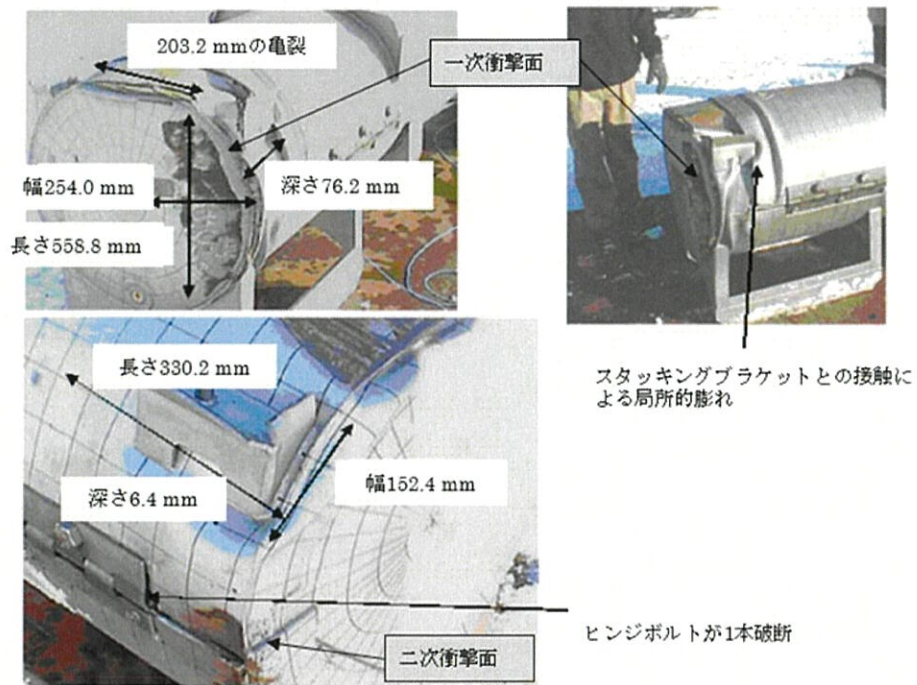
写真(ロ)A 付 1- 2 Prototype-1 輸送容器内部



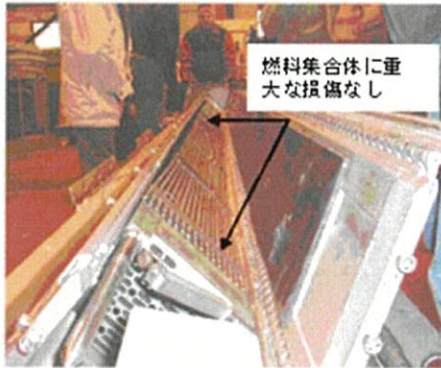
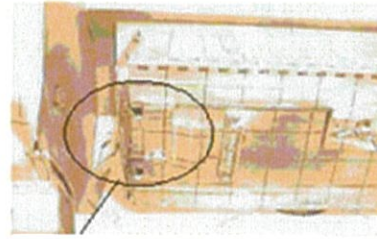
写真(ロ)A 付 1- 3 Prototype-1 試験①後の輸送容器外観



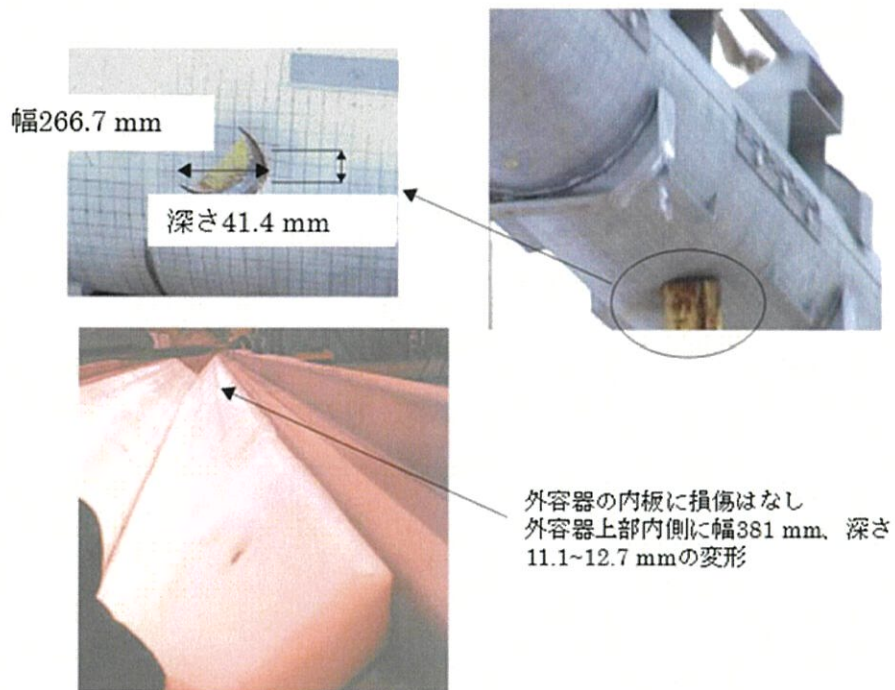
写真(ロ)A 付 1- 4 Prototype-1 試験①後の輸送容器内部の状況



写真(ロ)A付 1-5 Prototype-1 試験②後の輸送容器外観



写真(ロ)A 付 1- 6 Prototype-1 試験②後の輸送容器内部の状況



写真(ロ)A 付 1- 7 Prototype-1 試験③後の輸送容器内外部の状況

3.6. Prototype-2 に対する試験

3.6.1. 試験条件

Prototype-2 に対して、自由落下試験 1 回、落下試験 II を 1 回、落下試験 I を 4 回実施した。落下試験条件を表(ロ)A 付 1-3 に、Prototype-2 の重量を表(ロ)A 付 1-4 に示す。

3.6.2. 試験結果

3.6.2.1. 試験①後

試験①後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-8 に示す。

落下試験による変形箇所は、輸送容器の下部ノズル側端部（一次衝撃面）であった。補強リングによるガードで、上部ノズル側に変形は認められなかった。

下部ノズル側は、幅 228.6 mm、長さ 63.5 mm、深さ 19.1 mm の変形が確認された。

3.6.2.2. 試験②後

試験②後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-9 に示す。ターゲットとの接触部が、幅 355.6mm、長さ 254.0mm、深さ 50.8 mm 変形したものの、外板は貫通しなかった。外容器上側ケースの内部の検査において、内板に幅 609.6 mm、深さ 15.9 mm の変形が確認されたが、減速材ブロックは損傷しなかった。

3.6.2.3. 試験③後

試験③後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-10 に示す。試験③後についても局所的な変形を除き、容器の基本的な構造は損なわれなかった。

落下試験による変形箇所は、輸送容器の上部ノズル側端部（一次衝撃面）であった。補強リングによるガードによって、下部ノズル側に変形は生じなかった。上部ノズル側には、衝突面から軸方向 228.6 mm までの領域にしわが生じた。その結果、上側ケース全長は最大 mm 圧縮変形した。

外容器の上側ケースにのみ衝突する角度で試験を実施した結果、上側ケースと下側ケース間にギャップが最大 25.4mm のギャップが生じたが、外容器は閉じたままであり、ヒンジボルトの破損も見られなかった。

輸送容器内部の状況を写真(ロ)A付 1-11 に示す。輸送容器内部に大きな損傷は認められなかった。減速材ブロック及び中性子吸収材の位置は変化なかった。クラムシェルに大きな変形はなく、ドアは閉じたままであった。クラムシェルのトッププレートは、ボルトが 3 本破断したものの外れなかった。

軸方向スタッドに座屈が生じた結果、模擬燃料集合体は上部ノズル側へ 85.7 mm 移動した。下部ノズル近辺に模擬燃料集合体の大きな変形、損傷は認められなかった。

模擬燃料集合体を検査したところ、燃料棒に亀裂や破損のないことが確認された。燃料棒は軸方向に最大 25.4mm 移動したが、中性子吸収材の範囲内であった。燃料集合体外寸法は、213.8 mm から最小 209.6mm まで減少し、燃料棒ギャップは、3.1mm から最大 4.8mm に広がった。

3.6.2.4. 試験④⑤⑥後

外容器の定性的な性能確認のため、3 回の落下試験 I が実施された。試験には、試験③終了後、外容器、クラムシェルを補修した Prototype-2 が使用された。また、性能確認のため下記の変更が加えられた状態で試験を実施した。

- ・上側ケースのヒンジボルトについて、各ヒンジにつき 1 本ずつ削減
- ・エンドキャップ内面のシートメタルを排除
- ・クラムシェルのラッチのロックピン数を 18 から 12 に削減

なお、試験④～⑥は、一部を除き、他の試験で実施されたような容器の変形部や模擬燃料集合体の寸法測定は実施されなかった。

試験④～⑥後の輸送容器内外部の状況を写真(ロ)A付 1-12、写真(ロ)A付 1-13 に示す。試験④～⑥後、容器の基本的な構造は損なわれなかった。ヒンジボルトは破損せず、外容器は閉じたままであった。

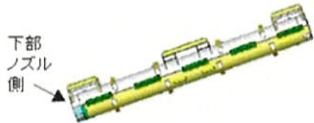

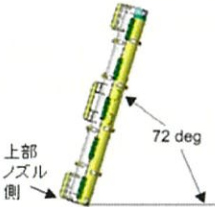
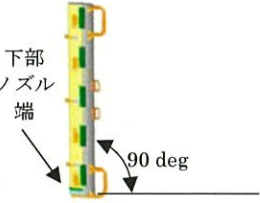
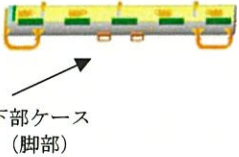
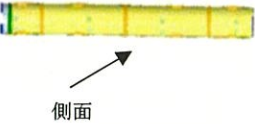
落下試験④について、下部ノズル端（一次衝撃面）が 41.3 mm 圧縮変形した。補強リングによるガードによって、二次衝撃による変形は小さかった。

落下試験⑤によって、脚部とフォークリフトポケットは大きく変形したが、外容器の胴体部はほとんど変形しなかった。

落下試験⑥では、ヒンジが衝突面になったが、ヒンジ及びヒンジボルトは破損せず、外容器はほとんど変形しなかった。

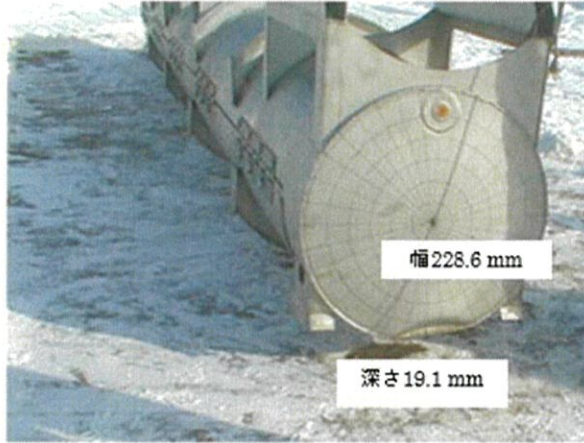
試験④～⑥後、クラムシエルのラッチは破損せず、クラムシエルの扉は閉じたままであり、ショックマウントの破損も確認されなかった。クラムシエルのボトムプレートは分離していた。これは、試験③後に生じたクラムシエルと模擬燃料集合体の軸方向ギャップによって、衝撃が大きくなったことが原因であると考えられる。燃料棒に亀裂や破損は生じなかった。

表(ロ)A 付 1- 3 落下試験実施内容 (Prototype-2)

	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
Prototype-2	①	自由落下 (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・20° 傾斜落下 ・上側ケースの下部ノズル側から落下 	
	②	落下試験 II (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・20° 傾斜落下 ・上側ケースの上部ノズル側から落下 ・ピンとの接触箇所は上側ケースの中央 	
	③	落下試験 I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・72° コーナー落下 ・上側ケースの上部ノズル側から落下 	
	④	落下試験 I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・垂直落下 ・下部ノズル側から落下 	
	⑤	落下試験 I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・水平落下 ・下側ケース (脚部) 側から落下 	
	⑥	落下試験 I (落下高さ □m)	<ul style="list-style-type: none"> ・水平落下 ・側面から落下 	

表(ロ)A 付 1- 4 Prototype-2 の重量内訳

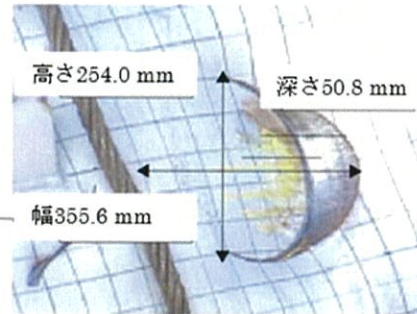
	重量	
外容器重量		
クラムシエル重量		
模擬燃料集合体重量		
総重量	2,294 kg	



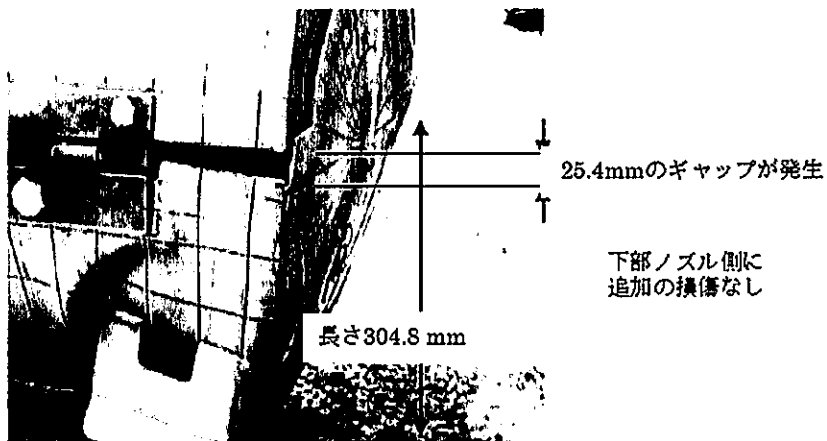
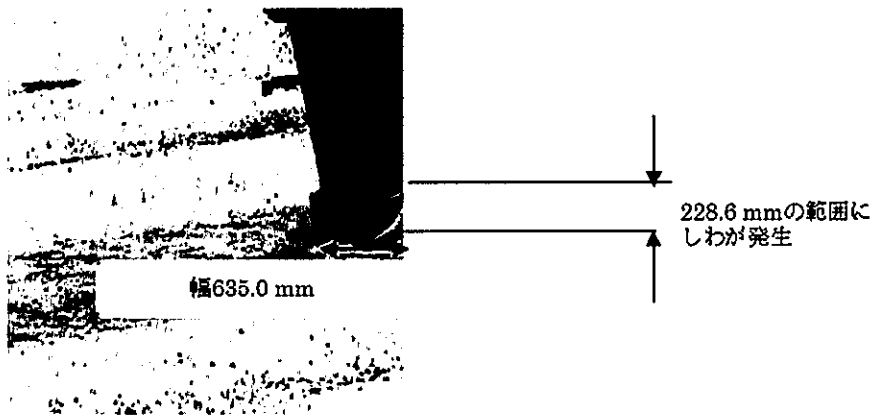
写真(ロ)A 付 1- 8 Prototype-2 試験①後の輸送容器の外観



重心位置に衝突
衝突時にバウンド



写真(口)A 付 1- 9 Prototype-2 試験②後の輸送容器の外観

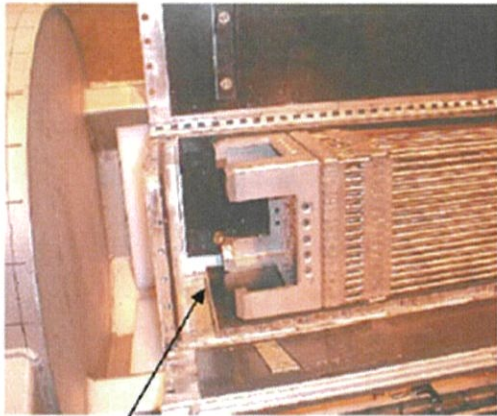


写真(ロ)A 付 1- 10 Prototype-2 試験③後の輸送容器の外観

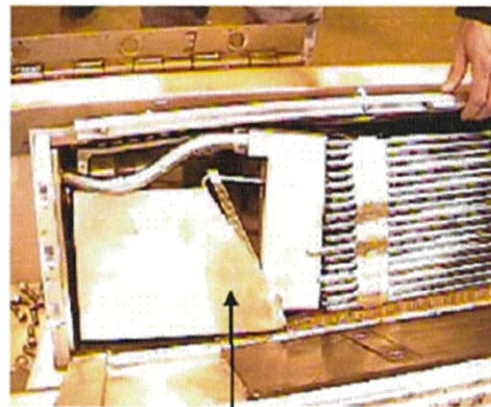


トッププレート、ボトムプレートは、
変形したものの外れず

ボルトが3本損傷
上部ノズル端は304.8 mmの長さにわたり
4.8 mm湾曲



燃料集合体は85.7 mm移動
下部ノズルに損傷なし



燃料棒は軸方向に25.4 mm移動
(移動後も中性子吸収材の範囲内)

写真(ロ)A 付 1-11 Prototype-2 試験③後の輸送容器内部状況



写真(ロ)A 付 1- 12 Prototype-2 試験④～⑥後の輸送容器内外部の状況



写真(ロ)A 付 1- 13 Prototype-2 試験④～⑥後の輸送容器下部ノズル側の状況

3.7. QTU-1 に対する試験

3.7.1. 試験条件

QTU-1 に対して、自由落下試験 1 回、落下試験 I を 1 回、落下試験 II を 1 回実施した。落下試験条件を表(ロ)A 付 1-5 に、QTU-1 の重量を表(ロ)A 付 1-6 に示す。なお、QTU-1 の内部状況の調査は、すべての試験終了後に実施された。

3.7.2. 試験結果

3.7.2.1. 試験①後

試験①後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-14 に示す。

輸送容器の上部ノズル側端部（一次衝撃面）に変形が確認された。変形量は、幅 254.0 mm、長さ 152.4 mm、深さ mm であった。

3.7.2.2. 試験②後

試験②後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-15 に示す。

落下試験による変形箇所は、輸送容器の上部ノズル側端部（一次衝撃面）であった。補強リングによるガードによって、下部ノズル側に変形は生じなかった。

上部ノズル側は、上側ケース全面が変形した。上側ケースは最大 88.9 mm 圧縮変形した。

外容器は閉じたままであり、ヒンジボルトも破断しなかった。衝撃により補強リングの溶接部が一部破断したが、これによって補強リングが移動することはなかった。衝突の結果、ホイストリングの 1 つが破断した。また、衝突により外容器の継ぎ目（写真(ロ)A 付 1-15 の丸で囲まれた領域）に小さな裂け目が生じた。

3.7.2.3. 試験③後

試験③後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-16 に示す。衝突点は試験②で小さな裂け目が生じた外容器継ぎ目付近であった。ターゲットとの接触部が、幅 152.4mm、深さ

38.1mm 変形したが、外板は貫通しなかった。また、ターゲット落下試験の結果、試験②で生じた裂け目が 28.6mm まで拡大したことが確認された。

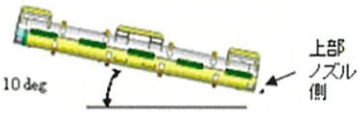
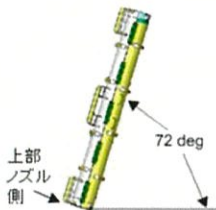
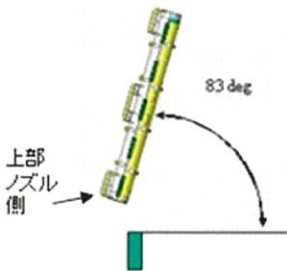
試験終了後の輸送容器内部の状況を写真(ロ)A 付 1- 17 に示す。また、試験③後の集合体外寸法、燃料棒ギャップ及びピッチの測定結果を表(ロ)A 付 1- 7 に示す。

内部に大きな損傷は認められなかった。減速材ブロック及び中性子吸収材の位置は変化なかった。クラムシエルの形状は維持されており、変形は生じなかった。

模擬燃料集合体を観察したところ、燃料棒に亀裂や破損のないことが確認された。また、燃料棒の軸方向位置が下部ノズルと上部ノズルの間に収まっていることが確認された。

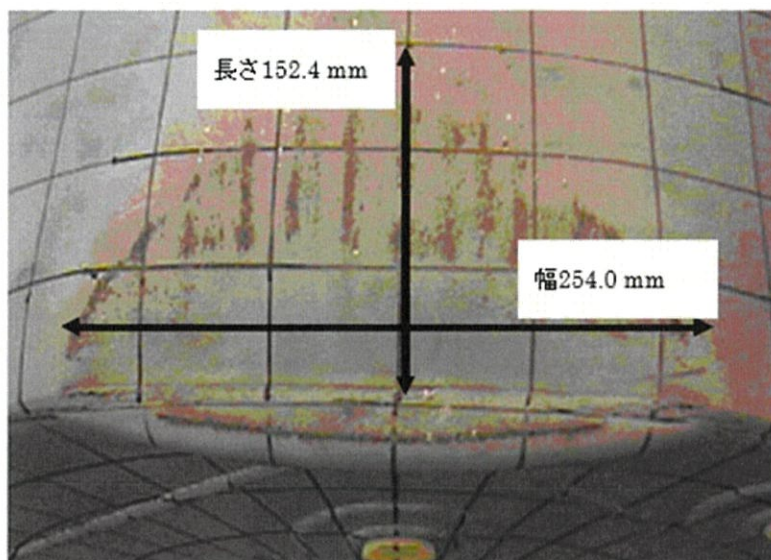
上部ノズル側の燃料集合体外寸法は、212.7 mm から最大 219.1 mm まで局所的に拡大した。一方、下部ノズル側は、212.7mm から最小 209.6mm までわずかに圧縮された。燃料棒ギャップは 3.1mm から最大 6.4 mm に拡大し、最大局所ピッチは 15.9 mm であった。第 10 グリッドはせん断破壊されていた。その他のグリッドについては、変形はみられたものの損傷は認められなかった。

表(ロ)A付 1-5 落下試験実施内容 (QTU-1)

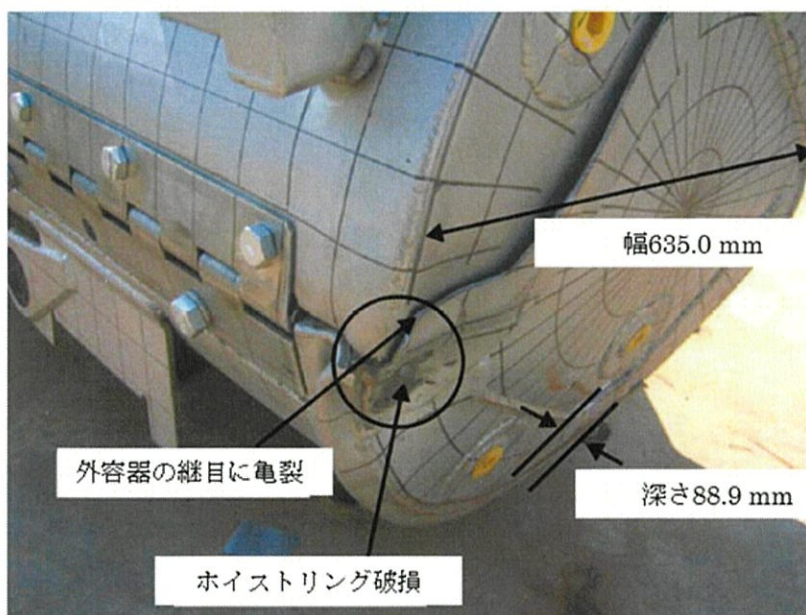
	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
QTU-1	①	自由落下 (落下高さ 1.29m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 10° 傾斜落下 ・ 上部ノズル側から落下 	
	②	落下試験 I (落下高さ 10.15 m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 72° コーナー落下 ・ 上側ケース、上部ノズル側から落下 	
	③	落下試験 II (落下高さ 1.07m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 83° コーナー落下 ・ 上側ケース、上部ノズル側から落下 ・ ピンとの接触箇所は外容器のヒンジ近辺 	

表(ロ)A付 1-6 QTU-1 容器重量内訳

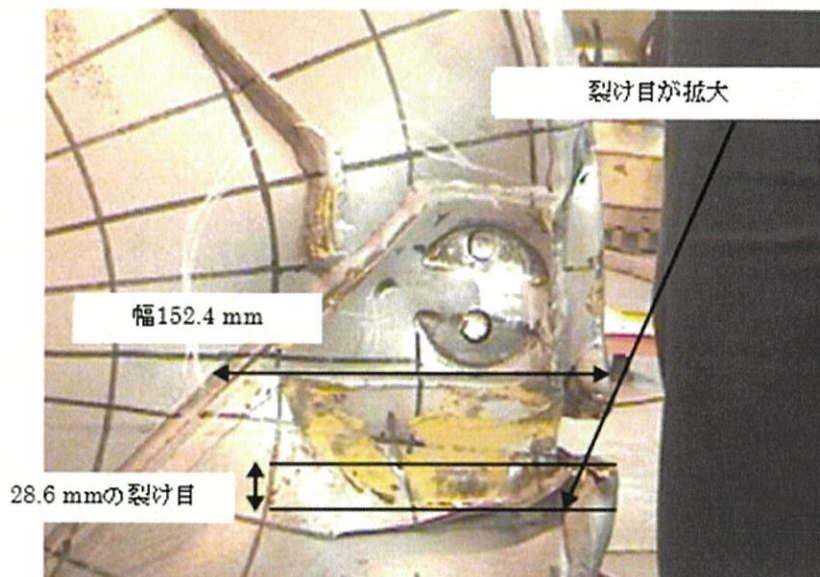
	重量
外容器重量	□
クラムシェル重量	
模擬燃料集合体重量	
総重量	2,175 kg



写真(ロ)A 付 1- 14 QTU-1 試験①後の輸送容器の外観



写真(ロ)A 付 1- 15 QTU-1 試験②後の輸送容器の外観



写真(ロ)A 付 1- 16 QTU-1 試験③後の輸送容器の外観



写真(ロ)A 付 1- 17 QTU-1 試験後の模擬燃料集合体外観

表(ロ)A付1-7 QTU-1 試験後の模擬燃料集合体寸法

位置	燃料集合体外寸法[mm]		燃料棒最大 ギャップ[mm]	最大ピッチ [mm]
	左側	右側		
下部ノズル ～第1グリッド	206.4	209.6	6.4	15.9
第1グリッド ～第2グリッド	206.4	203.2	6.4	15.9
第2グリッド ～第3グリッド	203.2	210.0	4.8	14.3
第3グリッド ～第4グリッド	212.7	212.7	3.2	12.7
第4グリッド ～第5グリッド	212.7	212.7	3.2	12.7
第5グリッド ～第6グリッド	212.7	212.7	4.8	14.3
第6グリッド ～第7グリッド	212.7	212.7	4.8	14.3
第7グリッド ～第8グリッド	212.7	212.7	4.8	14.3
第8グリッド ～第9グリッド	212.7	212.7	4.8	14.3
第9グリッド ～第10グリッド	212.7	215.9	6.4	15.9
第10グリッド ～上部ノズルの間	215.9	219.1	6.4	15.9
最大値	215.9	219.1	6.4	15.9
(参考) 試験前	212.7		3.2	12.7

3.8. QTU-2 に対する試験

3.8.1. 試験条件

QTU-2 に対して、自由落下試験 1 回、落下試験 I を 1 回、落下試験 II を 1 回実施した。落下試験条件を表(ロ)A 付 1-8 に、QTU-2 の重量を表(ロ)A 付 1-9 に示す。なお、QTU-2 の内部状況の調査は、すべての試験終了後に実施された。

3.8.2. 試験結果

3.8.2.1. 試験①後

試験①後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-18 に示す。

輸送容器の上部ノズル側端部（一次衝撃面）に変形が確認された。変形量は、幅 241.3 mm、長さ 152.4 mm、深さ 22.2 mm であった。

3.8.2.2. 試験②後

試験②後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-19 に示す。

落下試験による変形箇所は、輸送容器の下部ノズル側端部（一次衝撃面）であった。下部ノズル側端部から 177.8 mm の範囲にわたってしわが発生し、全長が□ mm 圧縮変形した。また、脚とエンドキャップとの溶接箇所に局所的な亀裂が見られた。

外容器は閉じたままであり、ヒンジボルトも破断しなかった。

3.8.2.3. 試験③後

試験③後の輸送容器外観を写真(ロ)A 付 1-20 に示す。ターゲットとの接触箇所が、幅 152.4mm、長さ 228.6mm、深さ 73.0mm 変形したものの、外板は貫通しなかった。

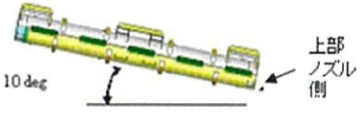
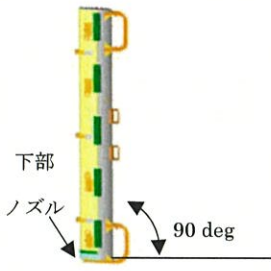
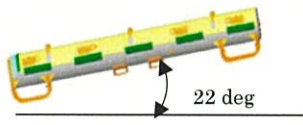
試験終了後の輸送容器内部の状況を写真(ロ)A 付 1-21 に示す。また、試験③後の集体外寸法、燃料棒ギャップ及びピッチの測定結果を表(ロ)A 付 1-10 に示す。

内部に大きな損傷は認められなかった。減速材ブロック及び中性子吸収材の位置は変化なかった。クラムシエルの形状は維持されており、変形は生じなかった。

模擬燃料集合体を検査したところ、燃料棒に亀裂や破損のないことが確認された。また、燃料棒の軸方向位置が下部ノズルと上部ノズルとの間に収まっていることが確認された。

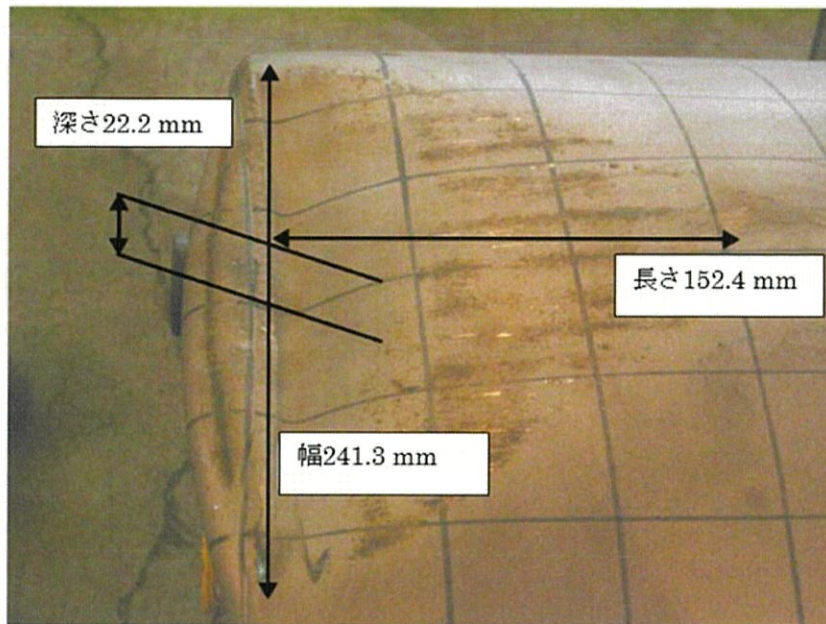
第1グリッドの角度が90度からおよそ118度のひし形状に変形した。下部ノズル側の燃料集合体外寸法は、下部から304.8mmの領域で拡大が認められ、212.7mmから最大219.1mmまで局所的に拡大した。燃料棒ギャップは3.1mmから最大18.3mmまで拡大し、最大局所ピッチは27.9mmであった。

表(ロ)A付 1-8 落下試験実施内容 (QTU-2)

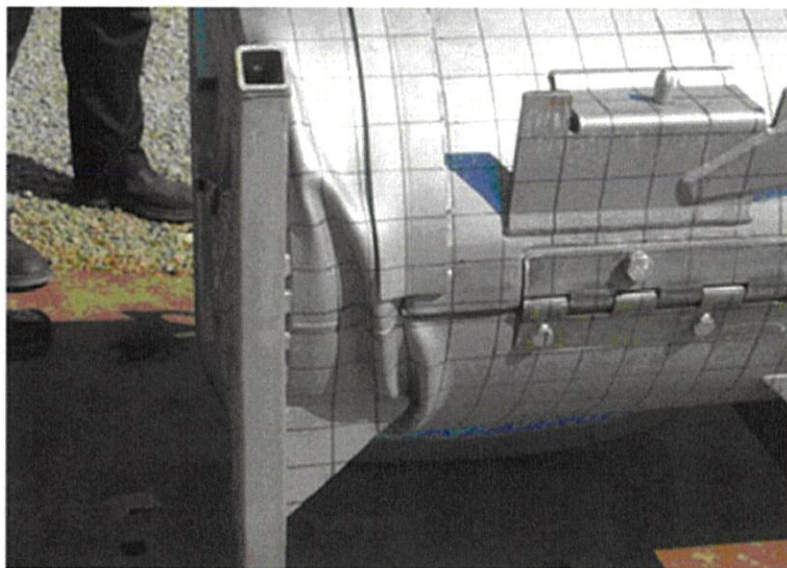
	No.	試験条件	落下角度、落下場所	
QTU-2	①	自由落下 (落下高さ 1.27m)	<ul style="list-style-type: none"> ・10° 傾斜落下 ・上部ノズル側から落下 	
	②	落下試験 I (落下高さ 10.18m)	<ul style="list-style-type: none"> ・垂直落下 ・下部ノズル側から落下 	
	③	落下試験 II (落下高さ 1.07m)	<ul style="list-style-type: none"> ・22° 傾斜落下 ・下側ケース、下部ノズル側から落下 ・ピンとの接触箇所は下側ケースの中央 	

表(ロ)A付 1-9 QTU-2 容器重量内訳

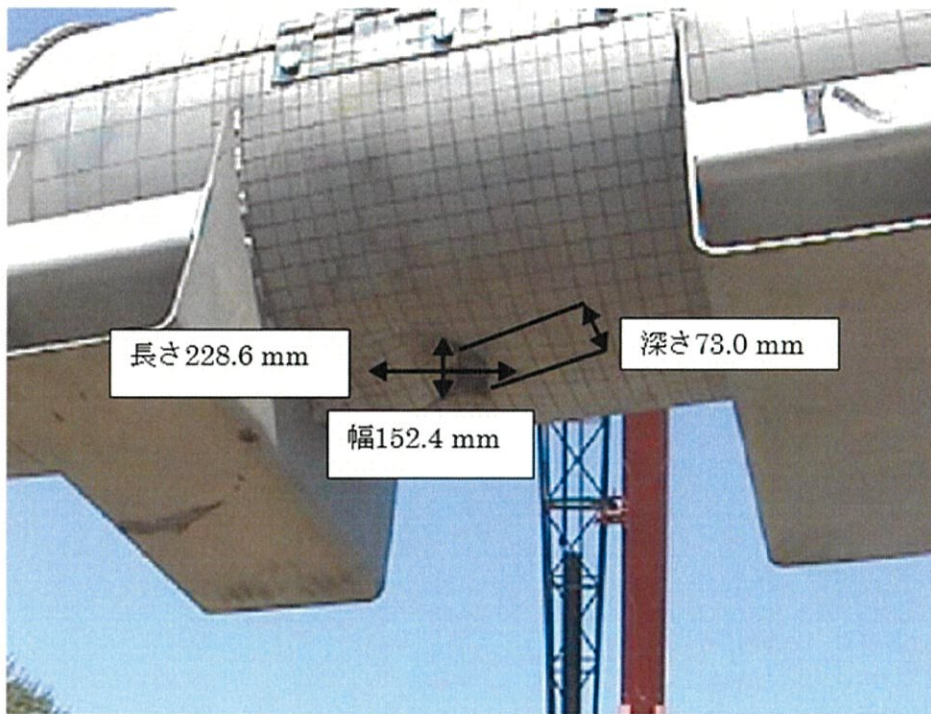
	重量
外容器重量	1,184 kg
クラムシェル重量	182 kg
模擬燃料集合体重量	802 kg
総重量	2,168 kg



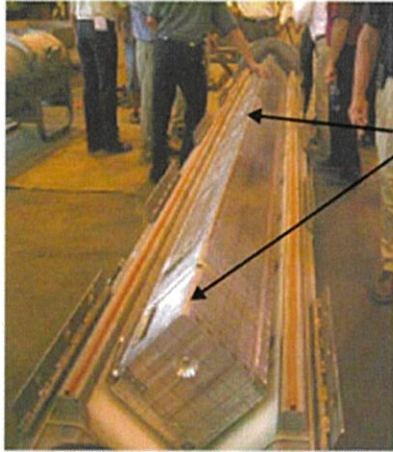
写真(ロ)A 付 1- 18 QTU-2 試験①後の輸送容器の外観



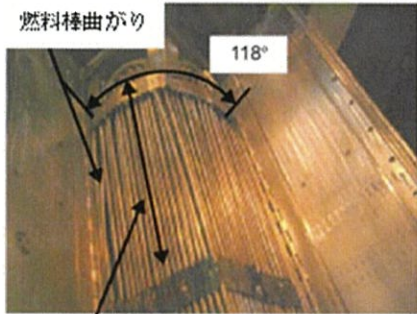
写真(ロ)A 付 1- 19 QTU-2 試験②後の輸送容器の外観



写真(ロ)A 付 1-20 QTU-2 試験③後の輸送容器の外観



クラムシェルに変形なし



燃料棒曲がり

118°

304.8 mmにわたって、
集合体外寸法が拡張



上部ノズルの損傷は軽微

写真(ロ)A 付 1- 21 QTU-2 試験後の輸送容器内部の状況

表(ロ)A付 1-10 QTU-2 試験後の模擬燃料集合体寸法

位置	燃料集合体外寸法[mm]		燃料棒最大 ギャップ[mm]	最大ピッチ [mm]
	左側	右側		
下部ノズル ～第1グリッド	219.1	215.9	18.3	27.9
第1グリッド ～第2グリッド	203.2	201.6	13.7	23.2
第2グリッド ～第3グリッド	201.6	195.3	8.0	17.6
第3グリッド ～第4グリッド	198.5	193.7	3.5	13.0
第4グリッド ～第5グリッド	204.8	200.0	3.9	13.4
第5グリッド ～第6グリッド	209.6	209.6	3.6	13.2
第6グリッド ～第7グリッド	212.7	212.7	3.7	13.2
第7グリッド ～第8グリッド	212.7	212.7	3.6	13.1
第8グリッド ～第9グリッド	212.7	212.7	4.1	13.6
第9グリッド ～第10グリッド	212.7	212.7	3.2	13.1
第10グリッド ～上部ノズルの間	214.3	214.3	3.2	12.8
最大値	219.1	215.9	18.3	27.9
(参考) 試験前	212.7		3.2	12.7

3.9. CTUに対する試験

3.9.1. 試験条件

CTUの輸送容器外観を写真(ロ)A付1-22、輸送容器内部を写真(ロ)A付1-23に示す。CTUに対して、自由落下試験1回、落下試験Iを1回、落下試験IIを1回実施した。落下試験条件を表(ロ)A付1-11に、QTU-2の重量を表(ロ)A付1-12に示す。なお、CTUの内部状況の調査は、耐火試験も含めたすべての試験終了後に実施された。

3.9.2. 試験結果

3.9.2.1. 試験①後

試験①後の輸送容器外観を写真(ロ)A付1-24、写真(ロ)A付1-25に示す。

輸送容器の上部ノズル側端部（一次衝撃面）に変形が確認された。補強リングによるガードによって、下部ノズル側に変形は認められなかった。また、補強リングの溶接部に損傷はみられなかった。上部ノズル側の変形量は、幅 215.9 mm、長さ 76.2 mm、深さ 25.4 mm であった。

3.9.2.2. 試験②後

試験②後の輸送容器外観を写真(ロ)A付1-26、写真(ロ)A付1-27に示す。

落下試験による変形箇所は、輸送容器の下部ノズル側端部（一次衝撃面）であった。輸送容器の下端から 228.6 mm（下側ケース）及び 304.8 mm（上側ケース）の位置にそれぞれしわが発生し、輸送容器全長が 12.7mm 短くなった。また、この影響で下部ノズル端の補強リングについて、溶接部が二か所破損し、固定ピンも破損したものの、補強リングの形状、位置は維持された。

外容器外板とヒンジ間に 1.6 mm のギャップが生じたが、外容器は閉じたままであり、ヒンジボルトも破断しなかった。

3.9.2.3. 試験③後

試験③後の輸送容器外観を写真(ロ)A付1-28に示す。ターゲットとの接触箇所が幅 152.4 mm、深さ 34.9 mm 変形した。また、接触部から上部ノズル端側に向かって 190.5

mm の時点で、外容器とヒンジ間に最大 12.7 mm のギャップが発生していたが、外容器は閉じたままであった。なお、外板は貫通せず、ヒンジ及びヒンジボルトは破損しなかった。

試験終了後の輸送容器の内部状況を写真(ロ)A 付 1- 29～写真(ロ)A 付 1- 32 に、集合体外寸法、燃料棒ギャップ及びピッチの測定結果を表(ロ)A 付 1- 13 に示す。

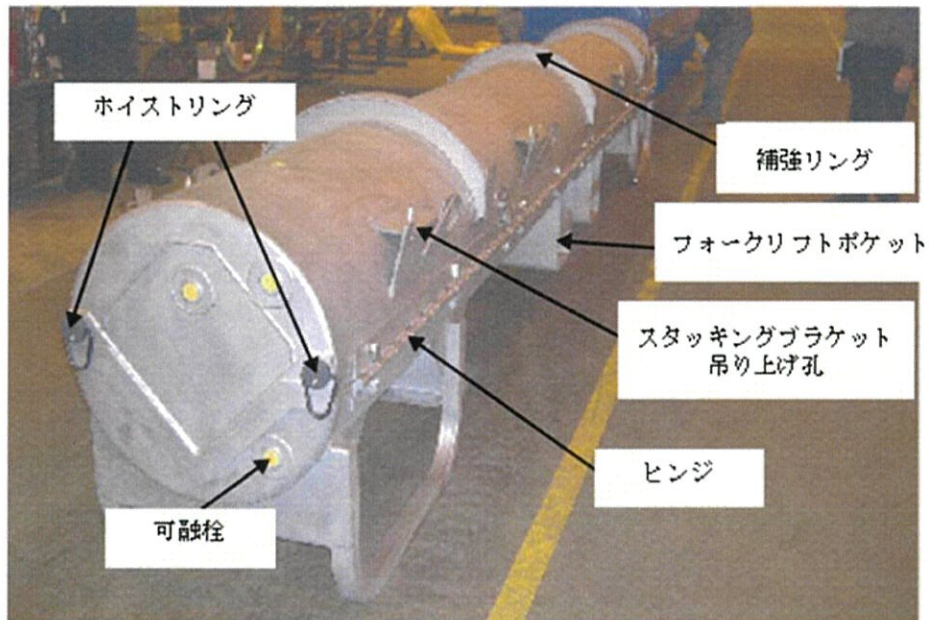
内部に大きな損傷は認められなかった。外容器上側ケースの減速材ブロックを固定しているリベットが一部破断していたが、減速材ブロックの位置に変化はなかった。ステンレス鋼のカバーを取り外し、減速材ブロックを検査したところ、写真(ロ)A 付 1- 30 に示すように損傷は認められなかった。

中性子吸収材の位置は変化なかった。クラムシエルの扉は閉じたままであった。写真(ロ)A 付 1- 29 の右上に示すように、ボトムプレート付近のクラムシエルヒンジの一部が破損したが、ボトムプレートが外れることはなかった。

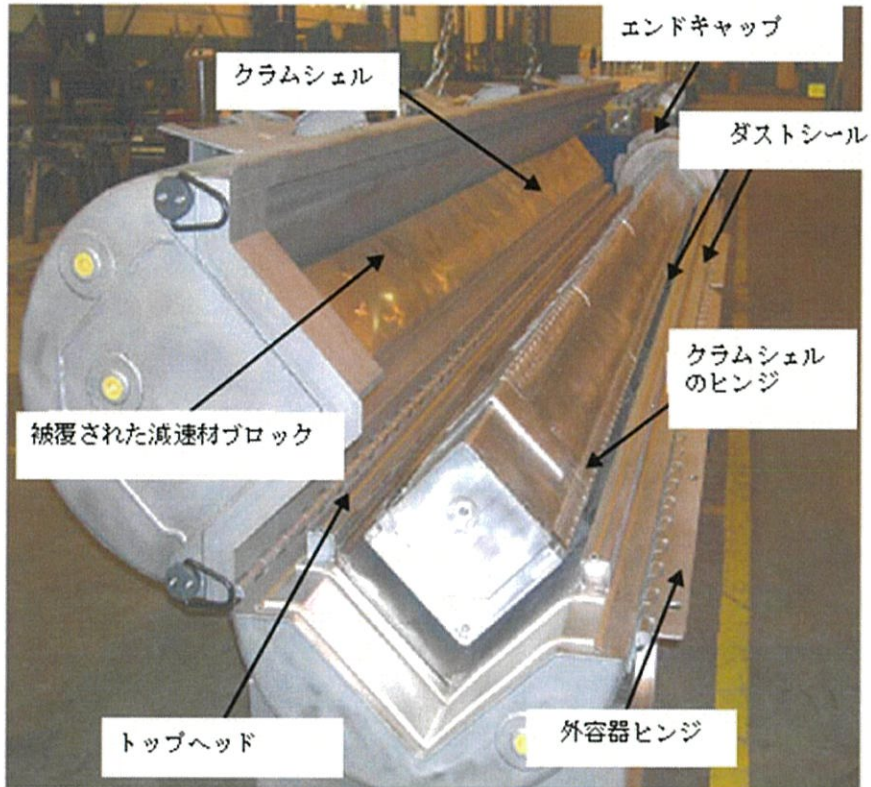
模擬燃料集合体を検査したところ、燃料棒 264 本のうち 20 本について、下部端栓溶接部で亀裂が入っていることが確認された。写真(ロ)A 付 1- 33 に亀裂の入った燃料棒の外観例を、図(ロ)A 付 1- 3 に亀裂の入った燃料棒の配置を示す。亀裂幅は最大で 1.9mm、亀裂長さは最大□mm であった。

燃料棒の軸方向位置が下部ノズルと上部ノズルとの間に収まっていることが確認された。

第 1 グリッドの角度が 90 度からおよそ 120 度のひし形状に変形した。下部ノズル側の燃料集合体外寸法は、下部から 508mm の領域で拡大が認められ、212.7 mm から最大 241.3 mm まで拡大した。燃料棒ギャップは 3.1mm から最大 15.6mm まで拡大し、最大局所ピッチは 25.1mm であった。


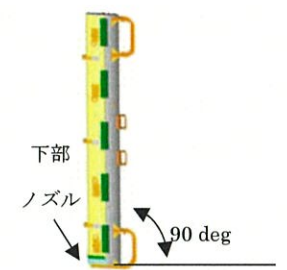
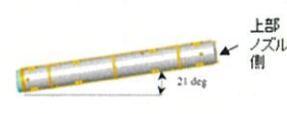


写真(ロ)A 付 1- 22 CTU 輸送容器外観



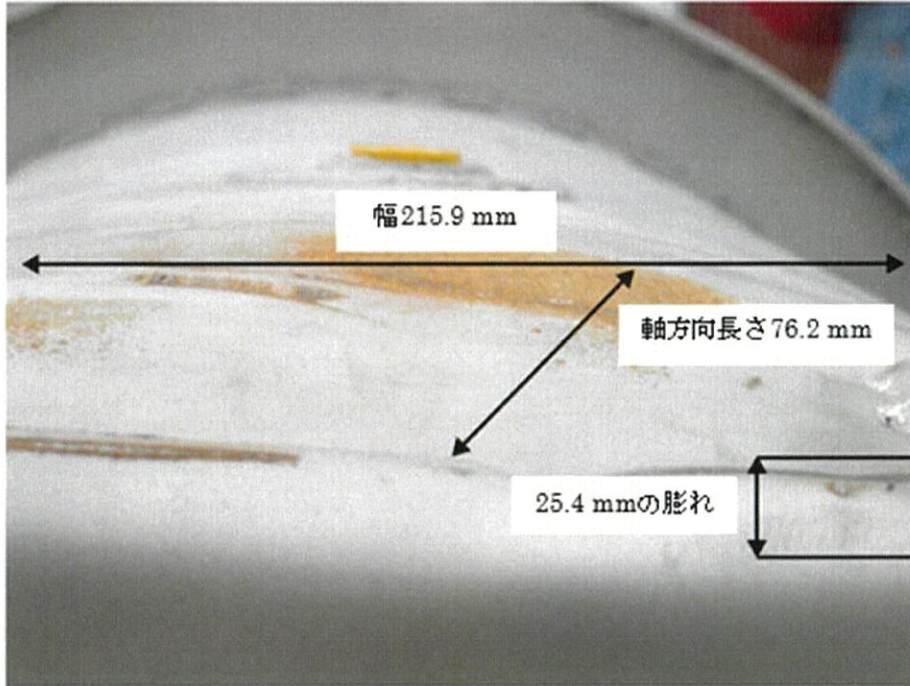
写真(ロ)A 付 1-23 CTU 輸送容器内部

表(ロ)A 付 1- 11 落下試験実施内容(CTU)

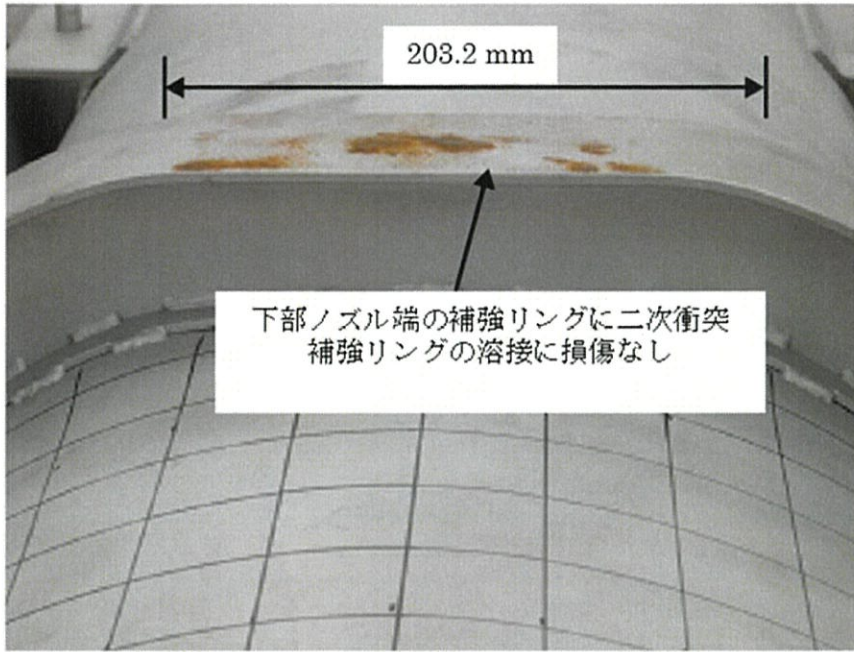
	No.	試験条件	落下角度、落下場所
CTU	①	自由落下 (落下高さ 1.27m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 9° 傾斜落下 ・ 上部ノズル側から落下 
	②	落下試験 I (落下高さ 10.0m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 垂直落下 ・ 下部ノズル側から落下 
	③	落下試験 II (落下高さ 1.07m)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 21° 傾斜落下 ・ 側面、下部ノズル側から落下 ・ ピンとの接触箇所は側面の中央 

表(ロ)A 付 1- 12 CTU 容器重量内訳

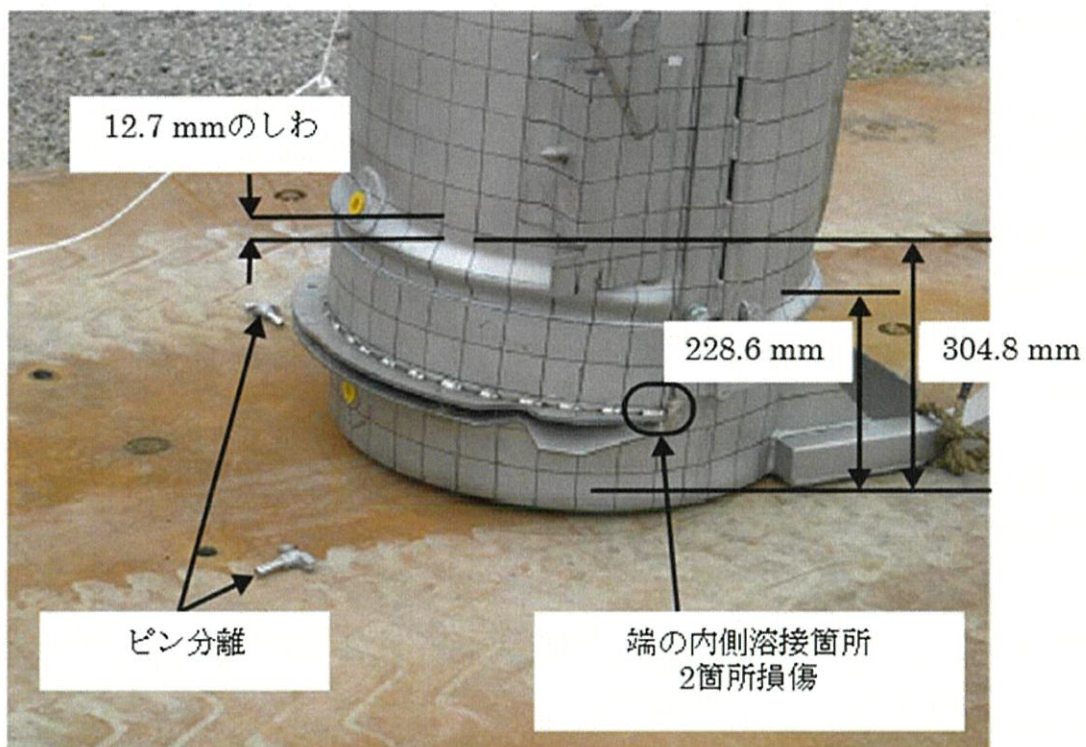
	重量
外容器重量	1,211 kg
クラムシェル重量	200 kg
模擬燃料集合体重量	795 kg
輸送容器総重量:	2,206 kg



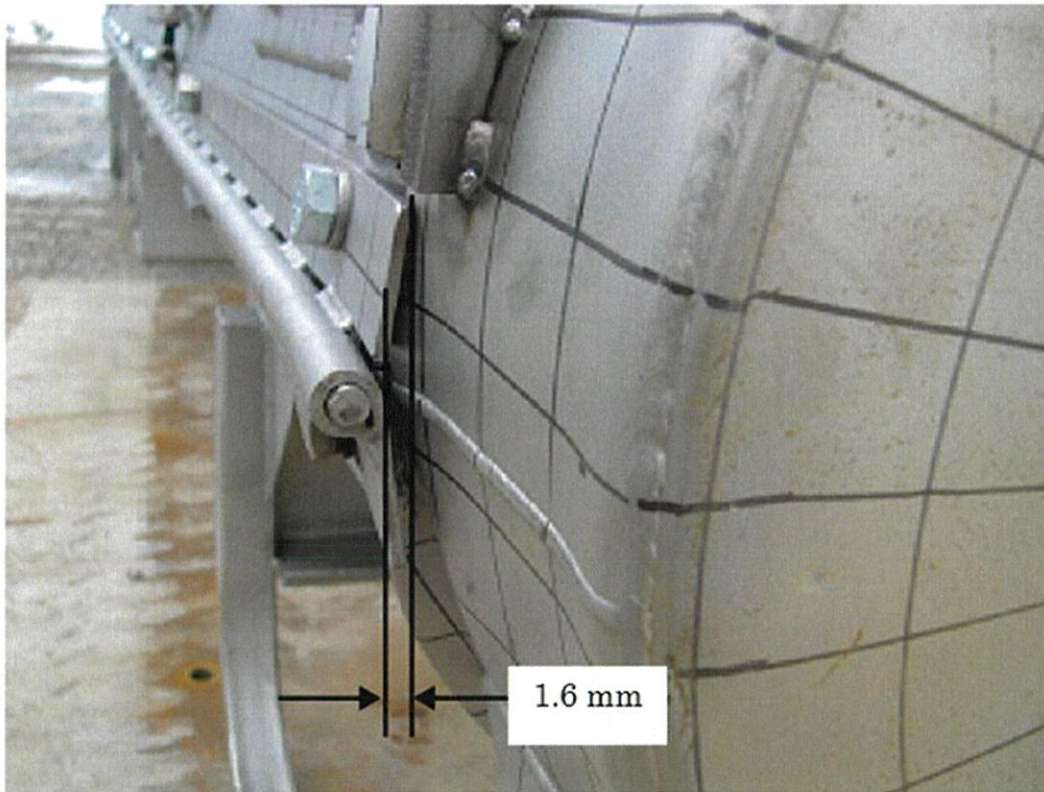
写真(ロ)A 付 1-24 CTU 試験①後の輸送容器の外観 (その 1)



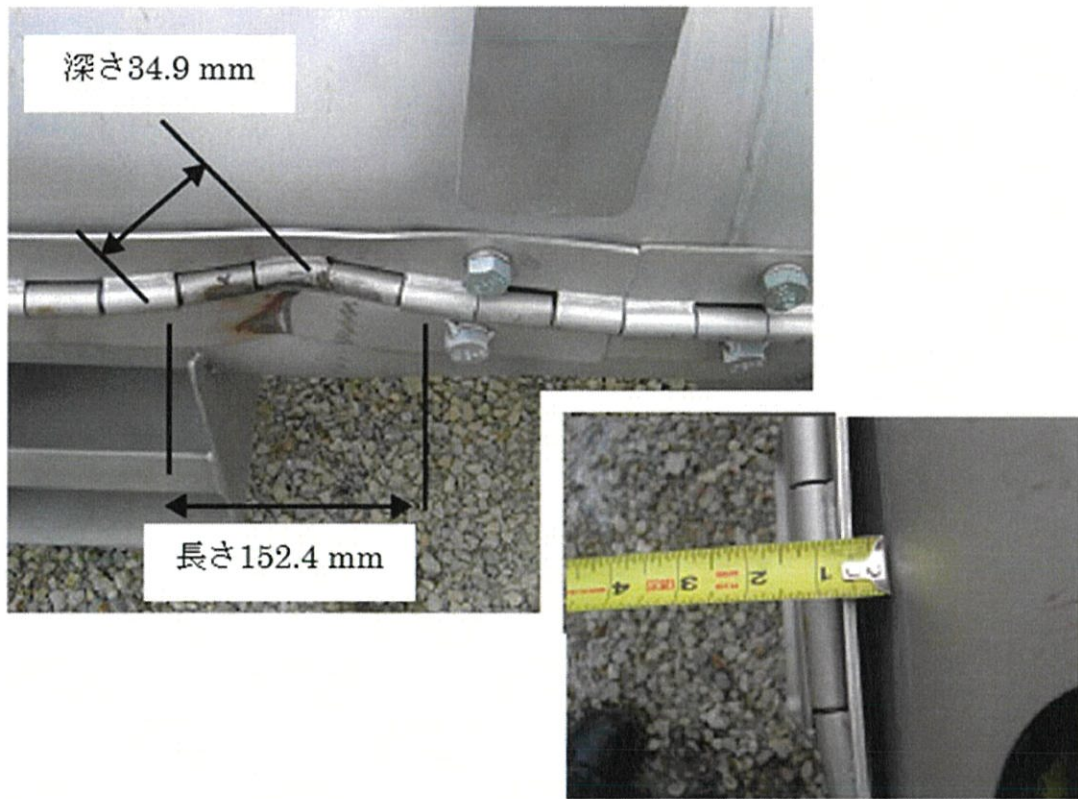
写真(ロ)A 付 1- 25 CTU 試験①後の輸送容器の外観 (その 2)



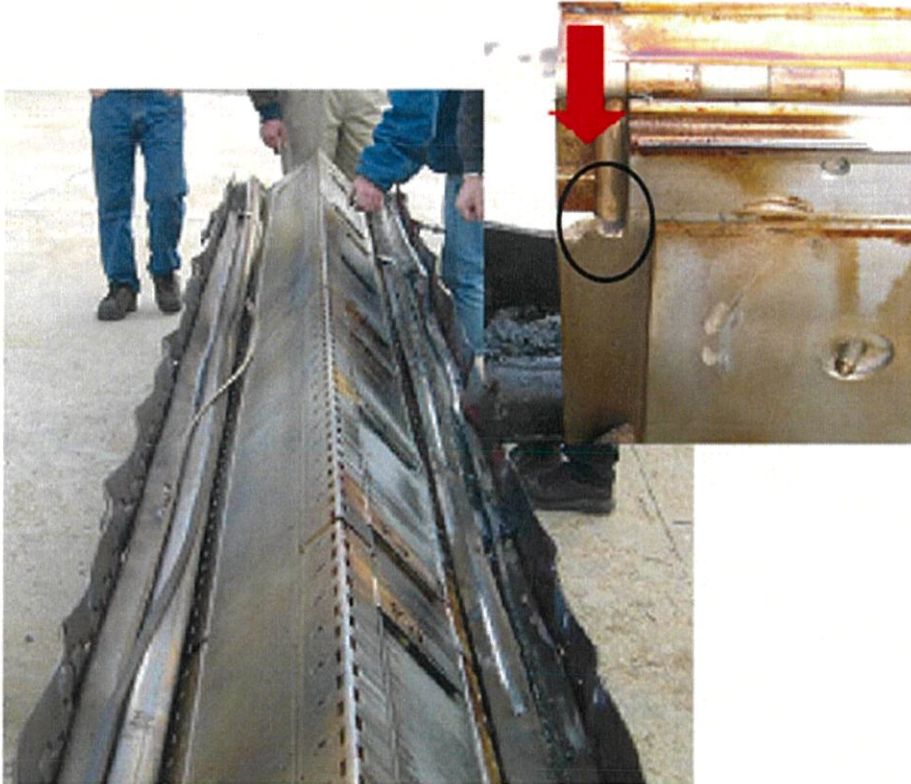
写真(ロ)A付 1-26 CTU 試験②後の輸送容器の外観(その 1)



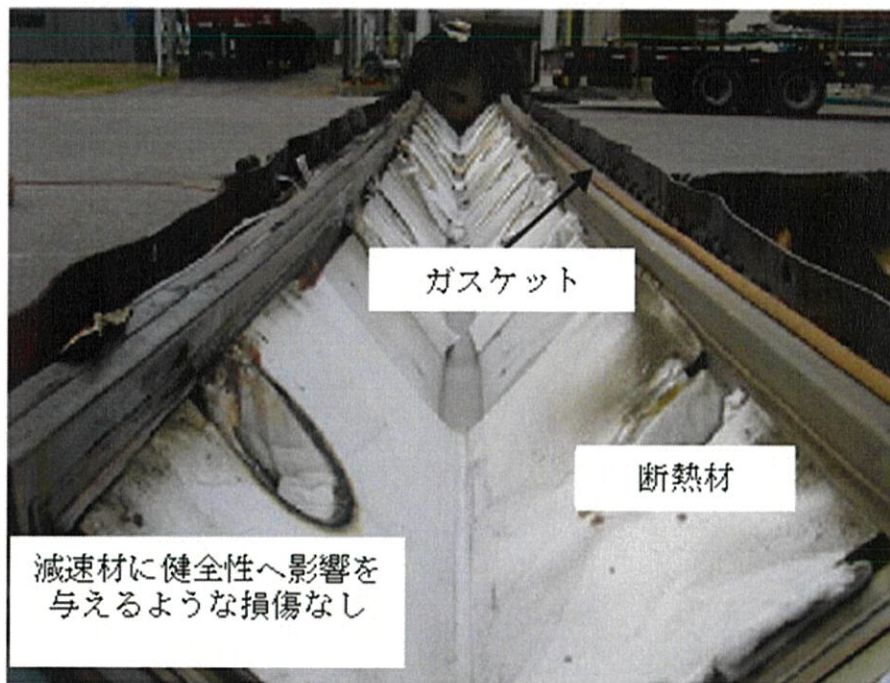
写真(口)A 付 1-27 CTU 試験②後の輸送容器の外観(その 2)



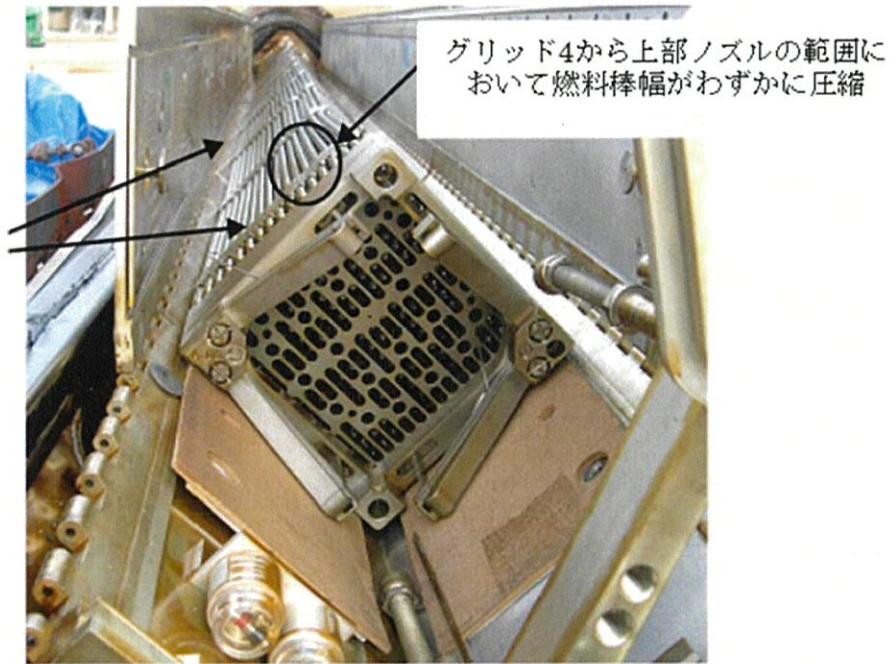
写真(ロ)A付 1- 28 CTU 試験③後の輸送容器の外観



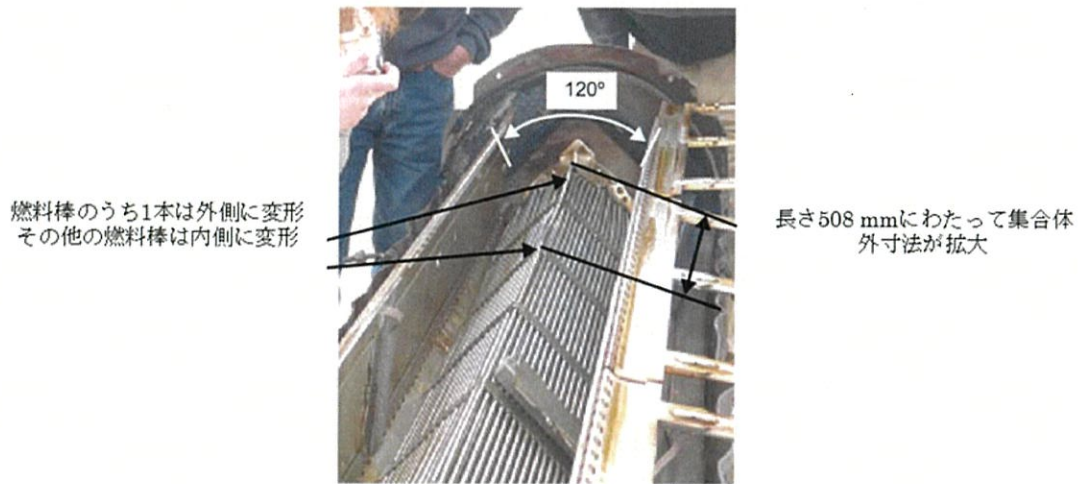
写真(口)A 付 1- 29 CTU 試験後の輸送容器の内部の状況 (その 1)



写真(ロ)A 付 1- 30 CTU 試験後の輸送容器の内部の状況 (その 2)



写真(ロ)A付1-31 CTU 試験後の模擬燃料集合体 (上部ノズル側)

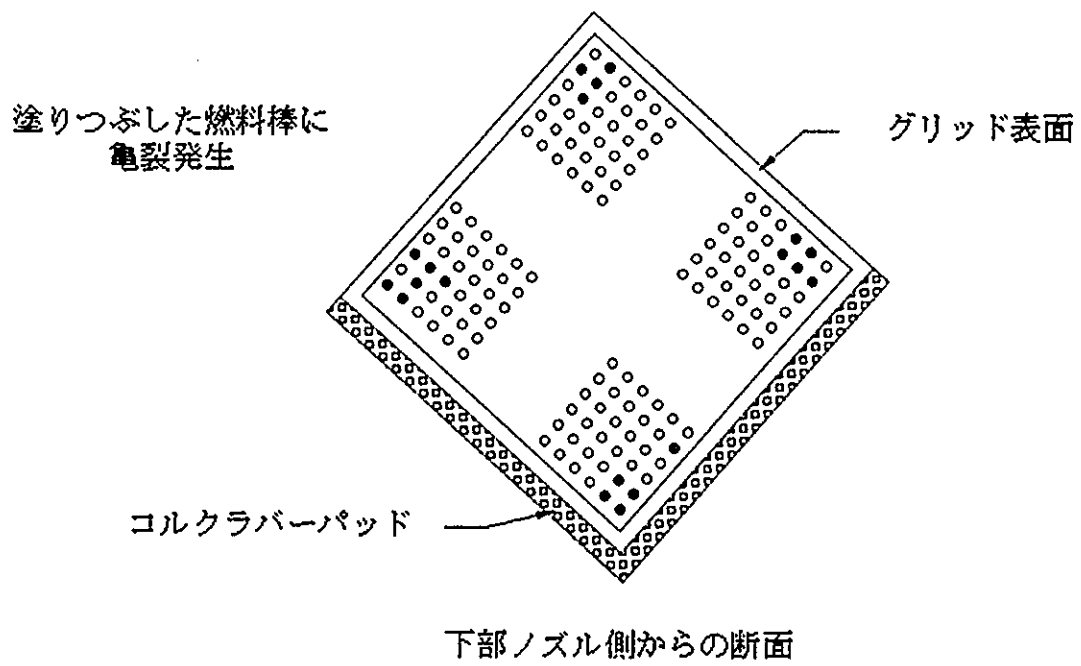


写真(ロ)A付 1-32 CTU 試験後の模擬燃料集合体 (下部ノズル側)



下部端栓溶接部に亀裂発生

写真(ロ)A 付 1-33 CTU 試験後の燃料棒割れ



図(ロ)A付1-3 CTU 割れが発生した燃料棒の配置

表(ロ)A付 1- 13 CTU 試験後の模擬燃料集合体寸法

位置	燃料集合体外寸法[mm]		燃料棒最大 ギャップ[mm]	最大ピッチ [mm]
	左側	右側		
下部ノズル ～第1グリッド	228.6	222.3	4.9	14.4
第1グリッド ～第2グリッド	211.1	211.1	15.6	25.1
第2グリッド ～第3グリッド	215.9	203.2	9.3	18.8
第3グリッド ～第4グリッド	214.4	215.9	8.6	18.2
第4グリッド ～第5グリッド	208.0	208.0	2.5	12.0
第5グリッド ～第6グリッド	208.0	212.7	5.2	14.7
第6グリッド ～第7グリッド	204.8	204.8	4.5	14.0
第7グリッド ～第8グリッド	212.7	208.0	4.2	13.7
第8グリッド ～第9グリッド	203.2	198.4	2.8	12.3
第9グリッド ～第10グリッド	212.7	215.9	3.1	12.6
第10グリッド ～上部ノズルの間	212.7	203.2	3.1	12.6
最大値	228.6	222.3	15.6	25.1
(参考) 試験前	212.7		3.1	12.6

4 結論

原形容器 5 基を対象に、A 型輸送物に要求される一般の試験条件下での自由落下試験(1.2m)、核分裂性輸送物に要求される特別の試験条件下での 9m 落下試験及び 1m ターゲット試験を実施した。

試験の結果、輸送容器の変形は局所的なものにとどまり、輸送容器内部のグラムシエル、中性子減速材、中性子吸収材は変形、移動しなかった。一方、CTU 落下試験においては、燃料棒 264 本のうち 20 本について、下部端栓溶接部で亀裂が入っていることが確認された。

(口)A 付属資料 2

落下試験における試験体重量に係る検討

1. はじめに

落下試験に用いられた一部の試験体は、本輸送物の設計最大総重量 (□ kg) より重量が軽くなっている。本付属資料では、設計最大総重量未満の試験体の落下試験における保守性を説明するものである。

2. 試験体重量と設計最大総重量との比較

各落下試験における試験体重量を下記に示す。

試験内容	試験体	試験体の輸送物重量
試作品試験	Prototype-1	2,301 kg
	Prototype-2	2,294 kg
認定試験	QTU-1	2,175 kg
	QTU-2	2,168 kg
認証試験	CTU	2,206 kg

本輸送物の仕様上における総重量は □ kg であり、上記に示すように Prototype-1、Prototype-2、CTU は重量が □ kg 以上であり、保守的な重量条件となっている。

一方で QTU-1、QTU-2 に関しては、仕様上における総重量と比べて、QTU-1 は □ kg、QTU-2 は □ kg 軽くなっている。

3. 各落下試験における落下エネルギーの比較検討

QTU-2 落下試験における落下高さは、一般の試験条件及び特別の試験条件で定められた落下高さよりも高い値となっており、落下高さの観点では保守的な試験条件となっている。

ここで、試験体重量を m 、重量加速度を g (9.80665 m/s²)、落下高さを h とすると、試験体の落下エネルギーを E は

$$E = m \times g \times h$$

と表せる。

この式を用いて各落下試験における QTU-1、QTU-2 の落下エネルギーと、設計最大総重量及び技術基準で定められた落下高さから求めた落下エネルギーを比較した結果を次表に示す。

試験条件	重量 m(kg)			落下高さ h(m)			落下エネルギーE(kJ)		
	QTU-1	QTU-2	設計最大 総重量	QTU-1	QTU-2	技術基準	QTU-1	QTU-2	設計最大総重量 ×技術基準
1.2 m 自由落下				1.29	1.27	1.2	28	27	<input type="checkbox"/>
落下試験 I (9m 自由落下)	2,175	2,168	<input type="checkbox"/>	10.15	10.18	9	217	216	<input type="checkbox"/>
落下試験 II (1 m ターゲット落下)				1.07	1.07	1	23	23	<input type="checkbox"/>

QTU-1、QTU-2の落下エネルギーは、設計最大総重量と技術基準高さを考慮した落下エネルギーよりも大きいことがわかる。

以上よりQTU-1、QTU-2における落下試験は他の落下試験と同様に、保守的な条件で行われていることが確認された。

(口)A 付属資料 3

垂直落下時における燃料健全性に係る検討

1. はじめに

本付属資料では、本輸送容器の収納物である燃料集合体（以下、NFI 製燃料集合体と称す）と落下試験時の模擬燃料集合体を比較し、垂直落下時における燃料健全性を説明する。CTU に対する垂直落下試験時（以下、CTU 落下試験と称す）に模擬燃料棒の下部端栓溶接部に発生した亀裂について発生メカニズムを確認した上で、模擬燃料集合体と NFI 製燃料集合体の構造の違いや、過去に実施された NFI 製燃料集合体に対する単体の落下試験の結果を考察し、NFI 製燃料集合体を本輸送容器に収納して落下させた場合には燃料棒に亀裂が発生しないことを確認する。

2. 燃料集合体及び模擬燃料集合体の基本構造について

NFI 製燃料集合体と模擬燃料集合体の仕様を表(ロ)A 付 3-1 に示す。なお、模擬燃料集合体の重量に関しては、各落下試験に用いられた計 5 体の模擬燃料集合体の中で、最も重量が小さいものを記載する。NFI 製燃料集合体及び模擬燃料集合体の構造図を図(ロ)A 付 3-1～図(ロ)A 付 3-5 に示す。また、NFI 製燃料集合体及び模擬燃料集合体の下部ノズルの概略図を図(ロ)A 付 3-6、図(ロ)A 付 3-7 に示す。

模擬燃料集合体は NFI 製燃料集合体と比べて全長が長く、集合体長さは約 mm、燃料棒長さは約 mm 長くなっている。NFI 製燃料集合体は、最下部支持格子が下部ノズルに接触しており、そこから第 2 支持格子までの距離は mm となっている。模擬燃料集合体は、最下部支持格子から第 2 支持格子までの距離は mm である。

集合体長さの違いにより支持格子数が多くなっており、支持格子間距離（最大値）は模擬燃料集合体の方が小さくなっている。

模擬燃料集合体の下部ノズルの長さは NFI 製燃料集合体の約 2 倍あり、図(ロ)A 付 3-6 及び図(ロ)A 付 3-7 に示すように模擬燃料集合体は下部ノズルの脚部が長くなっている。

NFI 製燃料集合体の設計最大重量及び模擬燃料集合体の最小重量を比較した結果、模擬燃料集合体は 17×17 型タイプ 57 より kg 重かった。

被覆管肉厚は模擬燃料集合体と 17×17 型タイプ 57 で同等であった。下部端栓長さは模擬燃料集合体の方が長く、燃料棒端部から下部端栓溶接部までの長さは約 mm 長くなっている。

燃料棒重量は、模擬燃料集合体と比較して NFI 製燃料集合体の 14×14 型、15×15 型の方が重くなっている。

表(ロ)A付 3-1 燃料集合体仕様

型式	NFI 製燃料集合体				模擬燃料集合体
	14×14 型	15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57	17×17 型 14フィート燃料
燃料集合体外寸 (mm)	197	214	214	214	
燃料集合体長さ (mm)	4,057	4,057	4,055	4,055	
支持格子数	7もしくは8	7	9	9	
最下部スパン (mm)					
下部ノズル長さ (mm)					
集合体重量※1 (kg)					
燃料棒長さ (mm)					
被覆管肉厚 (mm)	0.66	0.66	0.64	0.57	
下部端栓長さ※2 (mm)					
燃料棒重量※3 (kg)					

※1 NFI 製燃料集合体は設計上の最大重量、模擬燃料集合体は各落下試験に用いられた計 5 体の模擬燃料集合体の中の最小重量を記載

※2 下部端栓端部から端栓溶接部までの長さを記載

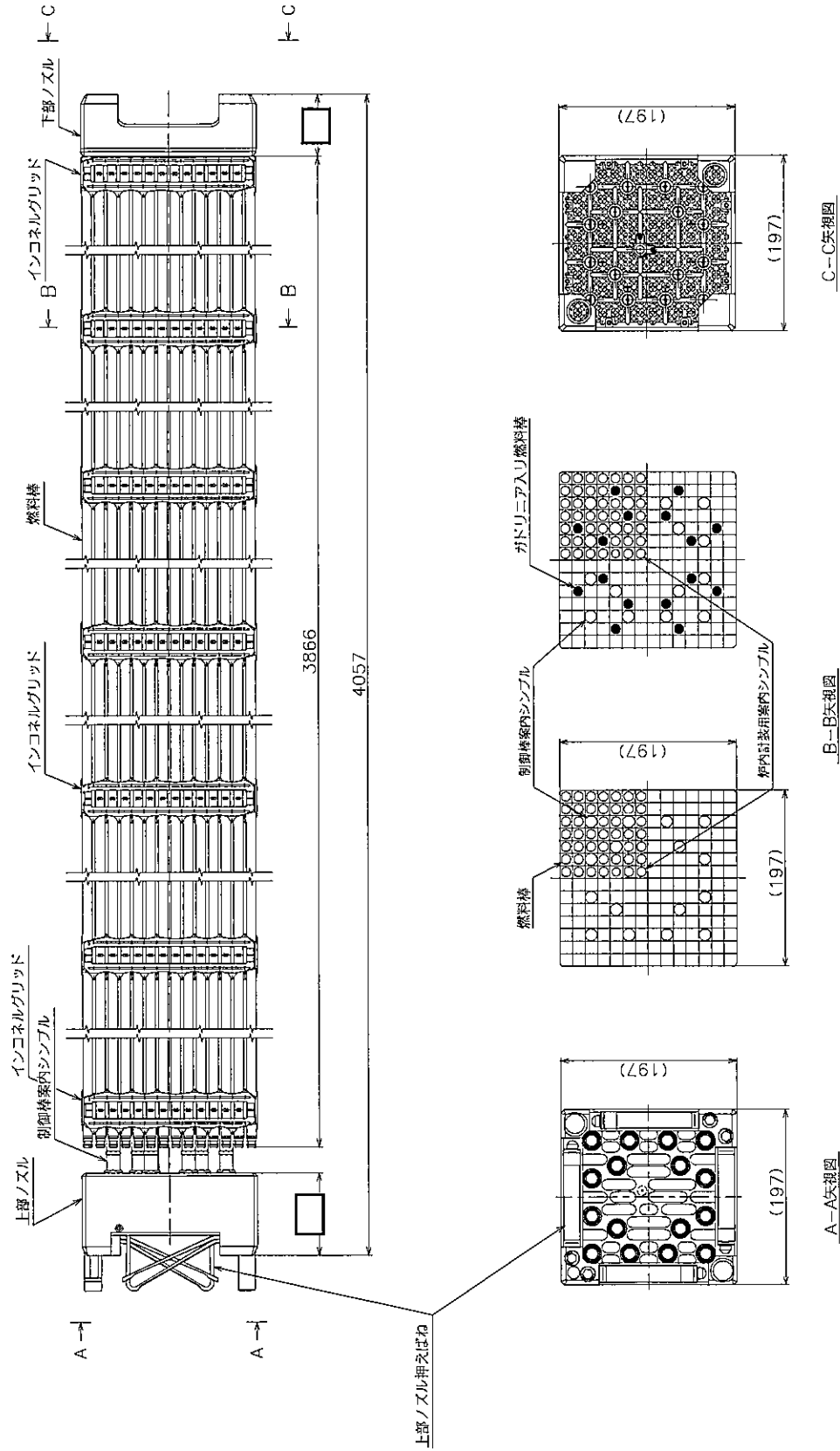
※3 二酸化ウラン燃料棒の重量を記載



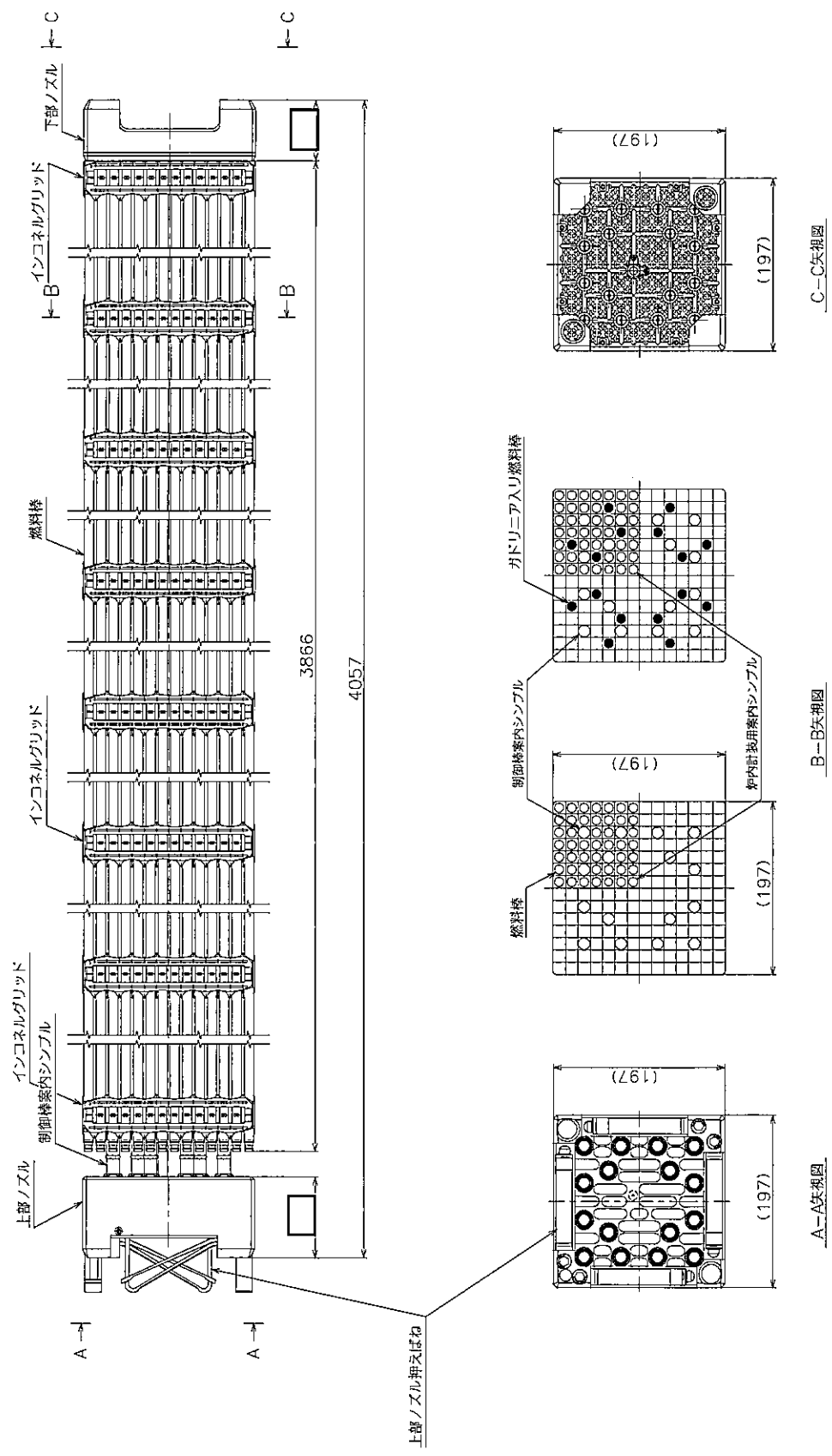
図(ロ)A付 3-1 17×17 型模擬燃料集合体構造図

※1 実際の落下試験に用いられた模擬燃料集合体には制御棒集合体は挿入されていないが、本図面では挿入された状態を描画している。

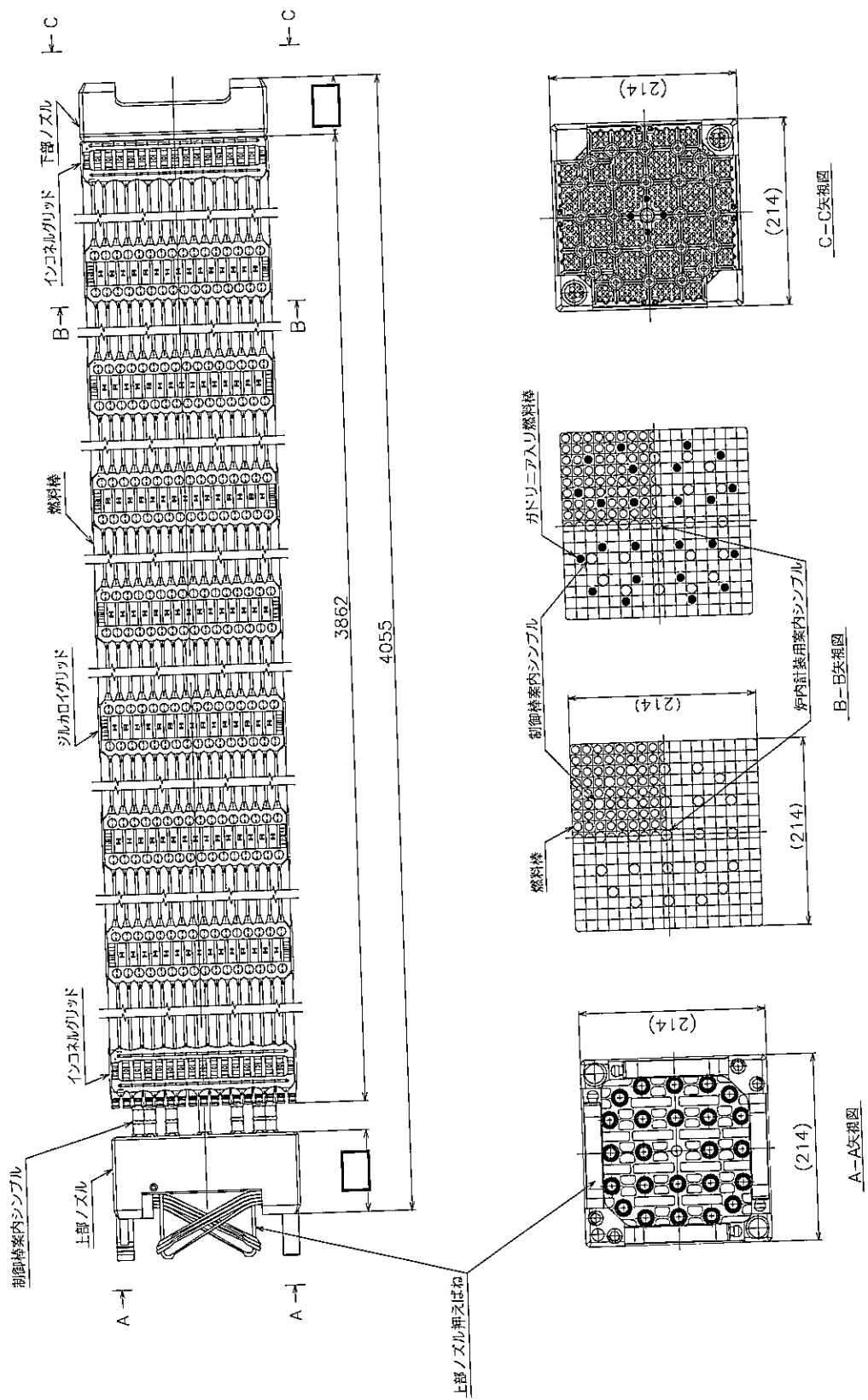
※2



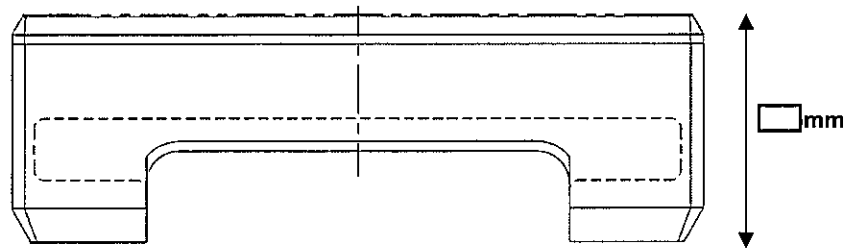
図(ロ)A付 3-2 14×14-7 グリッド型燃料集合体構造図



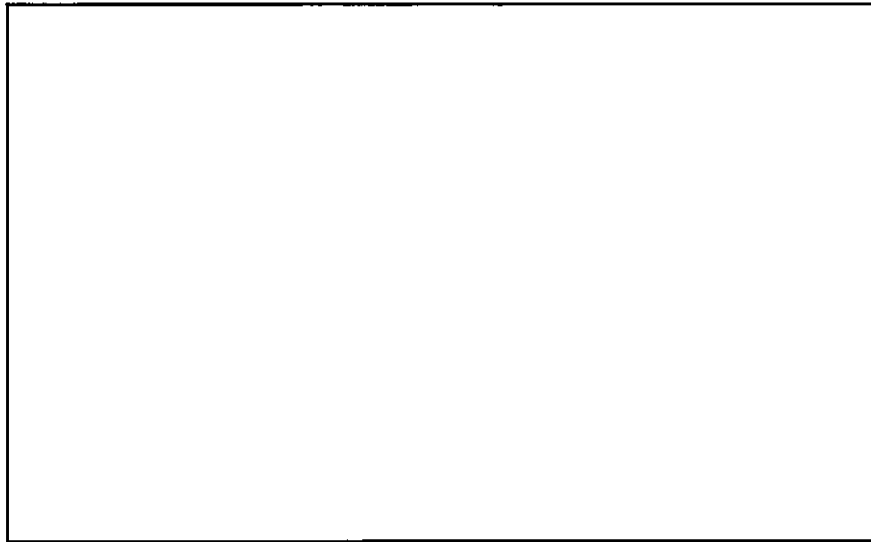
図(ロ)A付3-3 14×14-8グリッド型燃料集合体構造図



図(口)A付3-5 17×17型燃料集合体構造図



図(ロ)A付 3-6 17×17型タイプ 57の下部ノズル概略図



図(ロ)A付 3-7 模擬燃料集合体の下部ノズル概略図

3. NFI 製燃料集合体と模擬燃料集合体の材質について

NFI 製燃料集合体と模擬燃料集合体の材質を表(ロ)A 付 3-2 に示す。

密封境界である被覆管は、NFI 製燃料集合体はジルカロイ-4 被覆管と NDA 被覆管、模擬燃料集合体は [] 被覆管である。各合金の組成を表(ロ)A 付 3-3 に示す。いずれの合金もジルコニウムを母材とした合金となっている。被覆管の引張試験結果を図(ロ)A 付 3-8～図(ロ)A 付 3-10 に示す。 [] がわかる。

また NFI 製燃料集合体の骨子を形成する部材は、制御棒案内管、計装用案内管、支持格子、上部ノズル、下部ノズルである。

制御棒案内管及び計装用案内管は、NFI 製燃料集合体、模擬燃料集合体のいずれも [] [] 合金であり、同等の機械特性をもつ。最上部支持格子、最下部支持格子及び P グリッド（模擬燃料集合体のみ）は、NFI 製燃料集合体、模擬燃料集合体のいずれも [] である。中間部支持格子の材質は、 [] の 2 種類存在し、それらの機械特性は大きく異なる。機械特性は [] の方が低いことから、模擬燃料集合体は保守的な設計になっているといえる。上部ノズル及び下部ノズルは、NFI 製燃料集合体、模擬燃料集合体のいずれも [] である。

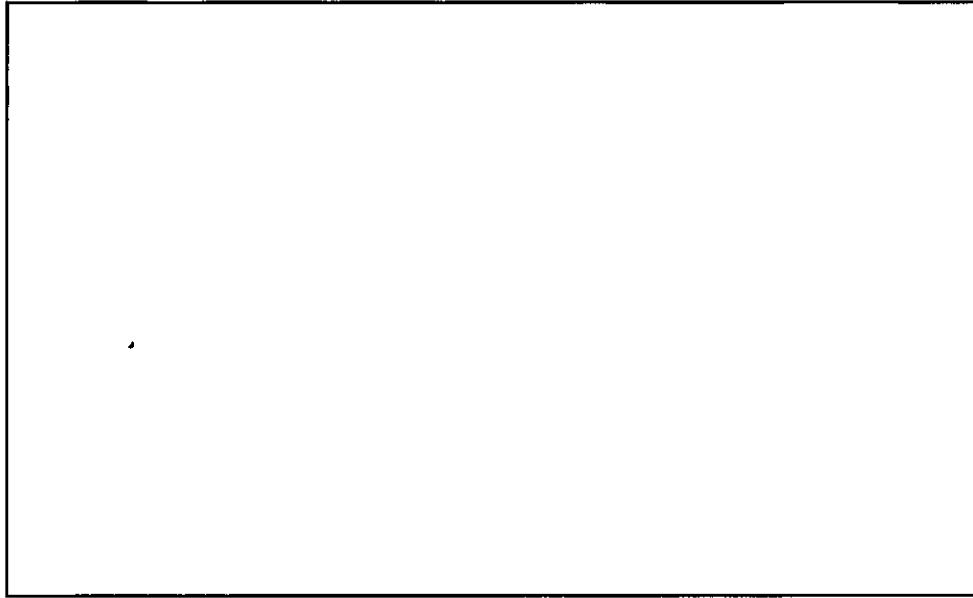
表(ロ)A付3-2 燃料集合体の材質一覧

型式	NFI 製燃料集合体				模擬燃料集合体
	14×14 型	15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57	
被覆管	ジルカロイ-4 被覆管 もしくは NDA 被覆管	ジルカロイ-4 被覆管 もしくは NDA 被覆管	ジルカロイ-4 被覆管	ジルカロイ-4 被覆管 もしくは NDA 被覆管	
制御棒案内管 計装用案内管	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	
中間支持格子	インコネル	インコネル	インコネル	インコネル もしくは ジルカロイ-4	
最上部支持格子 最下部支持格子 P-グリッド※	インコネル	インコネル	インコネル	インコネル	
上部ノズル 下部ノズル	ステンレス鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼	
ペレット	二酸化ウラン 又は Gd 入り二酸化ウラン	二酸化ウラン 又は Gd 入り二酸化ウラン	二酸化ウラン 又は Gd 入り二酸化ウラン	二酸化ウラン 又は Gd 入り二酸化ウラン	

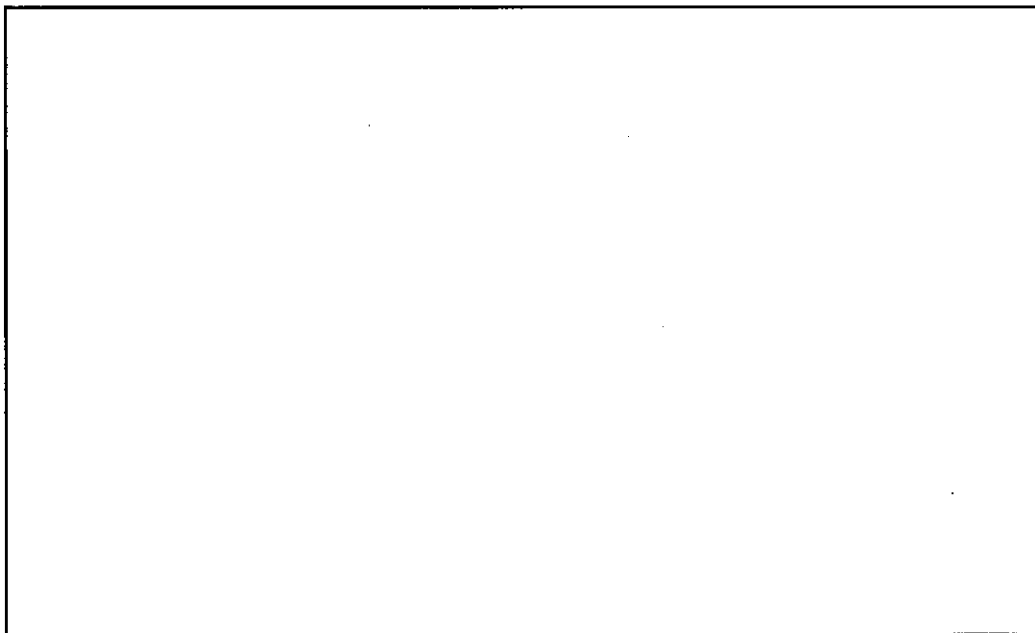
※模擬燃料集合体のみ

表(ロ)A付3-3 ジルコニウム合金の組成一覧

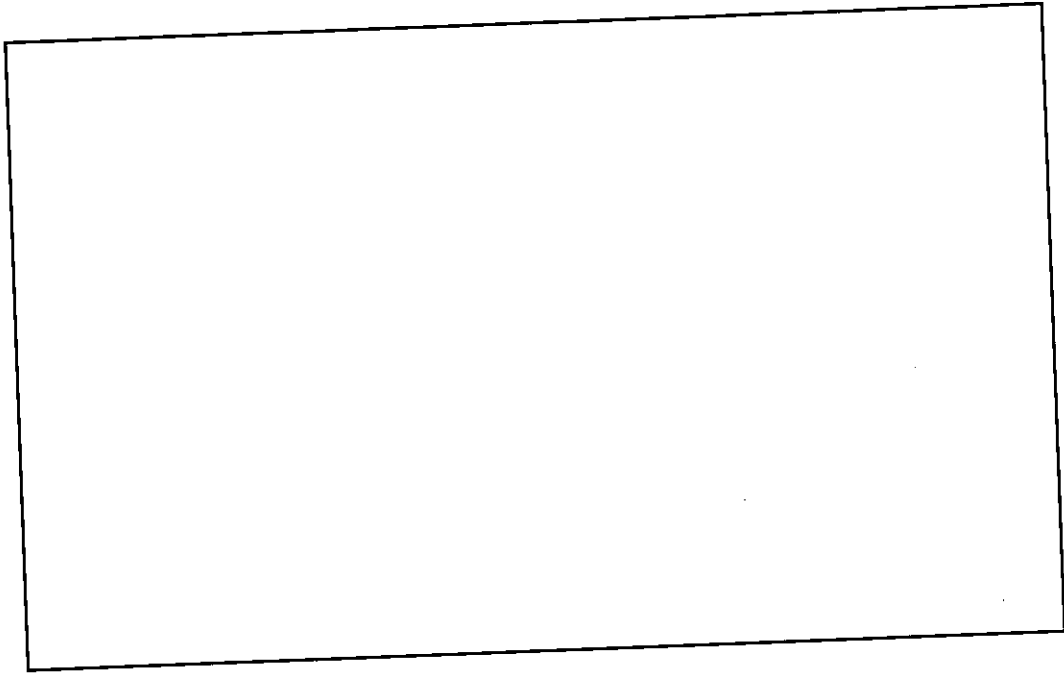
	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	Zr
NDA	0.90-1.15	0.24-0.30	0.13-0.19	—	0.08-0.14	0.007- 0.014	残り
ジルカロイ-4 (NFI の実績)	約 1.3	約 0.2	約 0.1	約 0.3	—	—	残り



図(ロ)A 付 3-8 被覆管の耐力温度依存性



図(ロ)A 付 3-9 被覆管の引張強さ温度依存性



図(口)A 付 3-10 被覆管の破断伸び温度依存性

4. CTU 落下試験時に発生した燃料棒亀裂の発生メカニズムについて

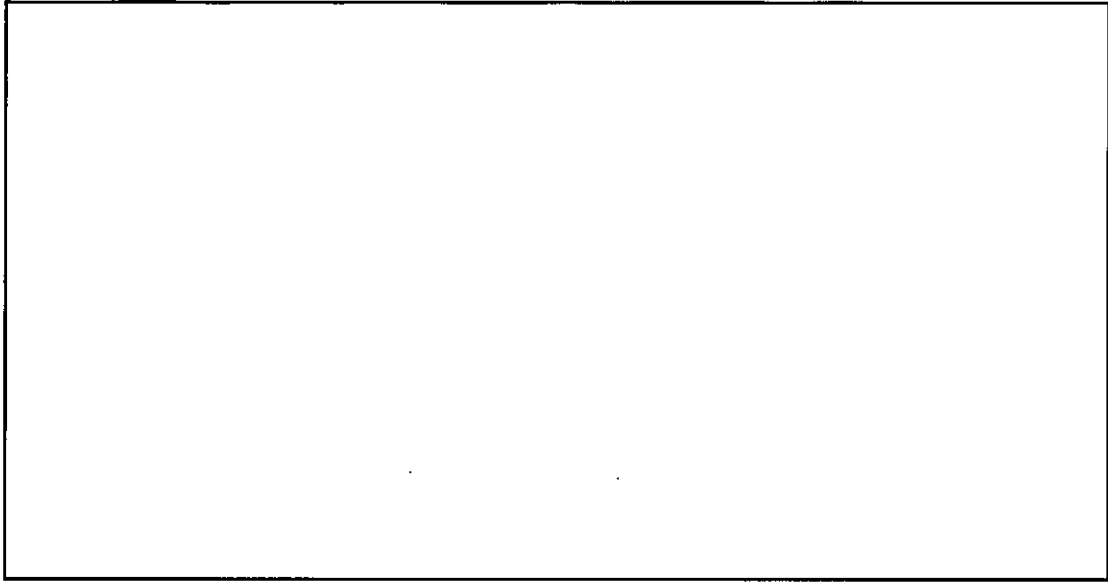
(ロ)A 付属資料 1 にて述べたように、CTU 落下試験時に燃料棒 20 本に対して亀裂が発生しており、亀裂の発生した燃料棒はいずれも集合体の四隅にある燃料棒であった (図 (ロ)A 付 1-3 参照)。特定の場所にもみ燃料棒の亀裂が確認されたことから、破損が発生した原因は燃料棒と下部ノズル上面の衝突による衝撃荷重のみが原因ではないと考えられる。

落下試験後の燃料棒の外観を確認したところ、燃料棒には曲がりが生じており、燃料棒の亀裂はすべて下部端栓溶接部で発生していた (写真(ロ)A 付 1-33)。

CTU 落下試験後の下部ノズルの外観を写真(ロ)A 付 3-1 に示す。下部ノズルの脚部が座屈し、それに伴い下部ノズル上面も大きく湾曲変形し、四隅が大きく傾いていることがわかる。

以上のことから、CTU 落下試験時に発生した燃料棒亀裂の発生メカニズムは以下の通りであると考えられる。

- ・落下の衝撃で下部ノズルの脚が座屈し、下部ノズル上面の四隅に大きな湾曲変形が発生する。
- ・下部ノズルが椀型の変形をすることで落下時の衝撃を吸収する。それにより、中央部の燃料棒が受ける衝撃荷重は小さくなる方向である。
- ・四隅については、中央部と比較して下部ノズルの脚に近いこと、下部ノズル変形による衝撃吸収効果は小さい。その結果、四隅の燃料棒に生じる衝撃荷重は中央部より大きくなる。また、下部ノズルが内側に折れ曲がることにより、燃料棒が燃料集合体中心方向に変形させられる。その中で、中実の下部端栓と中空の被覆管の境目となる下部端栓溶接部に曲げ応力が集中する。
- ・CTU 落下試験時に発生した燃料棒亀裂は四隅に集中していることから、この発生要因は燃料棒下端部に生じる衝撃荷重と曲げ応力の複合によるものと考えられる。



写真(ロ)A 付 3-1 CTU 落下試験後の下部ノズル

5. 垂直落下時における NFI 製燃料集合体の健全性について

5.1 集合体設計の比較

4.で述べたように、亀裂の発生した燃料棒位置や下部ノズルの変形挙動から考えて、燃料棒の亀裂は、燃料集合体落下時に燃料棒が受ける衝撃荷重と、変形した下部ノズルとの接触による曲げ応力の複合で発生したと考えられる。亀裂の発生メカニズムを考慮し、集合体構造の違いから、NFI 製燃料集合体と模擬燃料集合体のどちらに亀裂が発生しやすいか考察した。その結果を表(ロ)A 付 3-4 に示す。

NFI 製燃料集合体比較して、模擬燃料集合体の方が下部ノズルは長く、集合体重量は重いため、下部ノズルの変形量は大きくなり、燃料棒曲がりは大きくなると考えられる。そのため、燃料棒曲がりの観点からは模擬燃料集合体の方が燃料棒亀裂は発生しやすい設計といえる。

一方、下部ノズルの変形量大きい方が衝撃荷重は吸収され、燃料棒へ伝わる衝撃は小さくなる。また、ペレットを除く燃料集合体の全重量が燃料棒にのみに作用するとして考えると、「ペレットを除く燃料集合体の全重量÷燃料棒本数」が小さい方が衝撃荷重は小さくなる。そのため、燃料棒への衝撃荷重の観点からは模擬燃料集合体の方が燃料棒亀裂は発生しにくい設計といえる。

5.2 NFI 製 17×17 型 (タイプ 57) 燃料集合体の変形挙動について

次に NFI 製燃料集合体の落下時の変形挙動及び強度を考察するため、過去に実施した NFI 製 17×17 型 (タイプ 57) 模擬燃料集合体に対する単体の落下試験 (以下、単体落下試験) の結果を確認した。試験条件は以下の通りである。

- ・燃料タイプ : NFI 製 17×17 型 (タイプ 57) 燃料
- ・落下方向 : 燃料集合体の下部から垂直落下
- ・落下高さ : 5m

本試験において測定された最大加速度は以下の通りである。



Traveller XL 型輸送物に対する 9m 垂直落下時に下部ノズルの下端に発生する最大加速度は (ロ)A 付属資料 5 参照) であり、単体落下試験の最大加速度は、Traveller XL 型輸送物に対する 9m 垂直落下時の最大加速度より大きい。なお、Traveller XL 型輸送物内において、燃料集合体支持格子部はクラムシエルのグリッドパッド (板ばねとゴムからなるパッド) と接触しているが、グリッドパッドは通常輸送時の移動止めの効果はあるもののグリッドの変形を抑制する機能はない。そのため、単体落下試験の集合体支持格子の変形挙動は、Traveller XL 型輸送物に収納した場合と同等である。

写真(ロ)A 付 3-2 に単体落下試験後の外観写真を示す。下部ノズル中央部が衝突面に接触するまで変形しており、下部ノズル上面の曲がり変形としては構造上最大の変形量となっていたが、燃料棒の下部端栓溶接部に大きな曲がり確認されず、燃料棒に亀裂、破損は確認されなかった。

以上のように、Traveller XL 型輸送物で想定される加速度より大きい条件でも 17×17 型 (タイプ 57) の燃料棒に亀裂、破損は確認されなかったことから、Traveller XL 型輸送物に 17×17 型 (タイプ 57) を収納して 9m 落下を実施しても燃料棒に亀裂、破損は発生しないと見える。また、模擬燃料集合体で確認された燃料棒曲がりには 17×17 型 (タイプ 57) では構造上発生しないと考えられ、曲がりによる燃料棒に亀裂、破損は発生しないと見える。よって、CTU 落下試験時に発生した燃料棒亀裂は、模擬燃料集合体の設計に起因するものであり、NFI 製燃料集合体(17×17 型 (タイプ 57)) を Traveller XL 型輸送物に収納した場合は発生しない。

5.3 17×17 型 (タイプ 57) 以外の NFI 製燃料集合体の変形挙動について

5.2 項にて 17×17 型 (タイプ 57) を Traveller XL 型輸送物に収納して落下させた場合、燃料棒に亀裂、破損は発生しないことがわかったが、本項では 17×17 型 (タイプ 57) 以外の NFI 製燃料集合体についても、亀裂、破損が発生しないことを考察する。また、燃料棒に座屈が生じないことを確認する。

まず、燃料棒曲がりの観点で、NFI 製燃料集合体の設計比較結果を以下に述べる。

- ・ 下部ノズル長さはすべての燃料タイプでほぼ同等である。
- ・ 燃料集合体外寸が大きい方が下部ノズルは曲がりやすいと考えられるが、他の設計より小さい 14×14 型を除き、15×15 型、17×17 型 (タイプ 64) 及び 17×17 型 (タイプ 57) は同等である。
- ・ 集合体重量が重い方が下部ノズルの変形量は大きくなるが、17×17 型 (タイプ 57) は最も重い。

以上のことから、17×17 型 (タイプ 57) が最も下部ノズルが変形しやすく、燃料棒曲がりが最も発生しやすい設計であるといえる。

次に、燃料棒に加わる衝撃荷重の観点で、NFI 製燃料集合体の設計比較結果を以下に述べる。また、表(ロ)A 付 3-5に垂直落下時の燃料棒の荷重、応力、座屈荷重の比較をまとめる。

- ・ 落下時に端栓溶接部に発生する圧縮応力は、17×17 型 (タイプ 57) が最も大きくなる。
- ・ 燃料棒の最下部スパンの座屈荷重は、17×17 型 (タイプ 57) が最も低く、最も座屈が発生しやすい。なお、いずれの燃料棒についても垂直落下時 □G) の軸方向最大荷重は、座屈荷重を下回る。

以上のことから、17×17 型 (タイプ 57) が端栓溶接部にかかる応力が最も大きくなる設計であるといえる。また、いずれの燃料設計においても燃料棒座屈は生じない。

以上のことから、17×17 型 (タイプ 57) は NFI 製燃料集合体の中で、燃料棒亀裂、破損の観点から最も保守的な設計であるといえる。そのため、17×17 型 (タイプ 57) 以外の NFI 製燃料集合体についても、Traveller XL 型輸送物に収納して 9m 落下を実施しても亀裂、破損は発生しない。

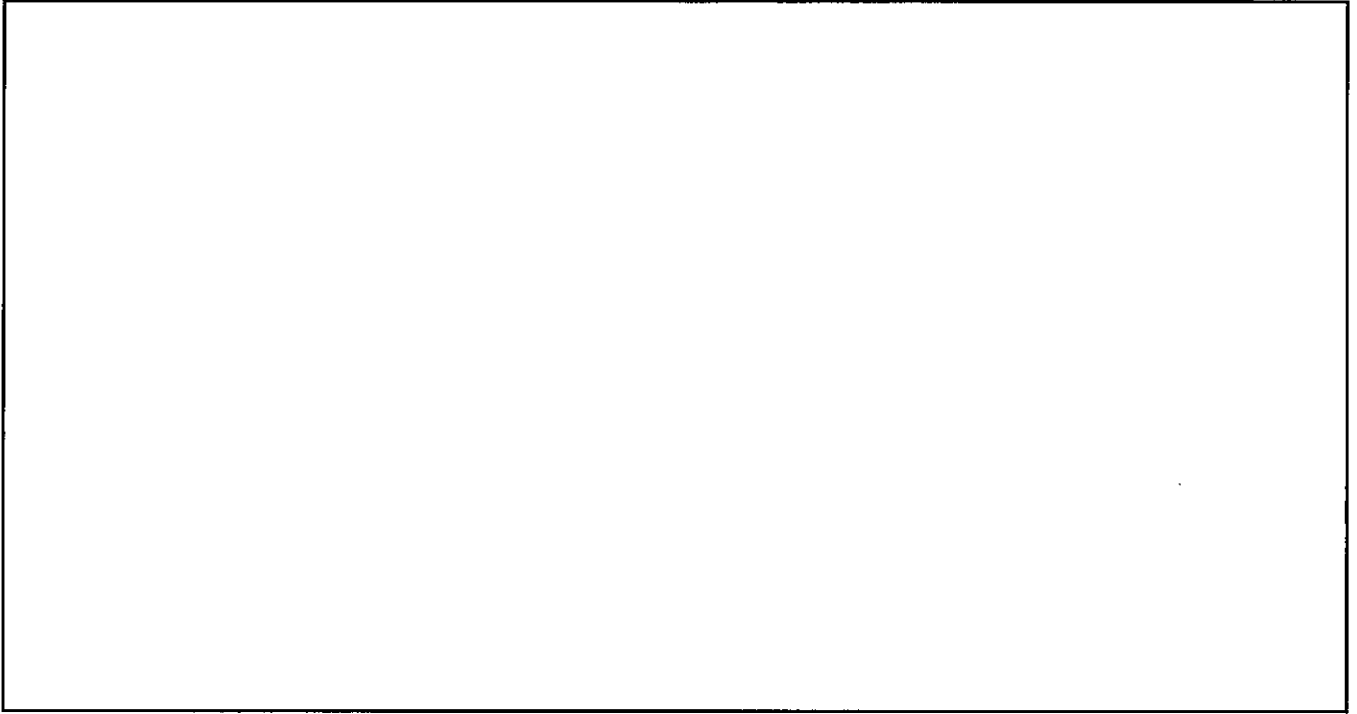
表(ロ)A 付 3-4 燃料集合体の構造の違いと燃料棒亀裂への影響

	NFI 製燃料集合体	模擬燃料集合体	燃料棒亀裂への影響
燃料集合体外寸 (mm)	214 (15,17 型)		燃料棒亀裂への影響
燃料集合体長さ (mm)	4,057 (14, 15 型)		
最下部スパン (mm)			
下部ノズル長さ (mm)			
集合体重量 (kg)			
燃料棒長さ (mm)	3,866 (14, 15 型の一部)		
被覆管肉厚 (mm)	0.57 (17 型タイプ 57)		
下部端栓長さ (mm)			
ペレット除いた燃料集合 体重量÷燃料棒本数(kg)			

表(ロ)A付3-5 NFI製燃料集合体の垂直落下時の燃料棒の荷重、応力、座屈荷重

比較項目		14×14 (7支持格子)	14×14 (8支持格子)	15×15	17×17 (タイプ64)	17×17 (タイプ57)
燃料 スペック	被覆管外径[mm]	10.72	10.72	10.72	9.50	9.50
	被覆管内径[mm]	9.40	9.40	9.40	8.22	8.36
	被覆管肉厚[mm]	0.66	0.66	0.66	0.64	0.57
	被覆管断面積(A) [mm ²]	20.86	20.86	20.86	17.81	15.99
	最下部スパン(φ)[mm]					
ペレットを除いた燃料集合体重量(m) [kg]						
燃料棒本数(n)		179	179	204	264	264
燃料 棒の 座屈 荷重、 応力、	垂直落下時の燃料棒軸方向最大荷重 [N]					
	$P_c = m \times a / n$					
	a : 加速度 (□□□□)					
	G: 重力加速度 9.80665 [m/s ²]					
	垂直落下時の端栓溶接部圧縮応力 [N/mm ²]					
	$\sigma = P_c / A$					
	燃料棒(最下部スパン)の座屈荷重 [N]					
	$P_{cr} =$ □□□□ P_{cr} : 座屈荷重 E: ヤング率 93,655 [N/mm ²] I_z : 被覆管の断面二次モーメント [mm ⁴]					

※落下時の軸方向燃料棒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



写真(ロ)A 付 3-2 単体落下試験後の NFI 製模擬燃料集合体(17×17 型タイプ 57)の外観

6. まとめ

本輸送容器の収納物である NFI 製燃料集合体と落下試験時の模擬燃料集合体を比較し、垂直落下時における燃料健全性を確認した。

重量は模擬燃料集合体の方が約 kg 重かった。構造は集合体長さ、支持格子数の違いを除き、大きな違いはなかった。材質は、模擬燃料集合体の各部材は、NFI 製燃料集合体と比較して同等もしくは保守的な設計になっていた。

亀裂の発生した燃料棒の位置や下部ノズルの変形挙動から、CTU 落下試験によって発生した燃料棒亀裂は、燃料棒下端部に生じる衝撃荷重と下部ノズルに変形が生じて集合体の四隅にある燃料棒と接触したことによる燃料棒曲げが複合したことで発生したことがわかった。

NFI 製燃料集合体の 17×17 型（タイプ 57）を単体で落下させた際の変形挙動及び強度を考察したところ、Traveller XL 型輸送物で想定される落下時の衝撃では 17×17 型（タイプ 57）の燃料棒は破損せず、模擬燃料集合体で確認された燃料棒曲がりは構造上発生しないことがわかった。また、17×17 型（タイプ 57）は NFI 製燃料集合体の中で、燃料棒亀裂、破損の観点から最も保守的な設計であるといえ、17×17 型（タイプ 57）以外の NFI 製燃料集合体についても、Traveller XL 型輸送物に収納して 9m 落下を実施しても亀裂、破損は発生しないことがわかった。

以上のことから、CTU 落下試験時に発生した燃料棒亀裂は、模擬燃料集合体の設計に起因するものであり、NFI 製燃料集合体を Traveller XL 型輸送物に収納した場合は発生しない。

(口)A 付属資料 4

水平落下時における燃料健全性に係る検討

1. はじめに

本付属資料では、本輸送容器に収納物である燃料集合体（以下、NFI 製燃料集合体と称す）を収納し、水平、傾斜の落下姿勢で落下試験Ⅰを実施した場合において、燃料棒に亀裂、破損が発生しないことを確認する。

2. 原型容器に対する落下試験について

原型容器に対する落下試験として、水平及び傾斜の落下姿勢で落下試験Ⅰが実施されたのは以下の3回である。

- ・ Prototype-1 試験①・・・14.5°傾斜落下、上側ケースの上部ノズル側から落下
- ・ Prototype-2 試験⑤・・・水平落下、下側ケース（脚部）側から落下
- ・ Prototype-2 試験⑥・・・水平落下、側面から落下

2.1. Prototype-1

Prototype-1 試験①の試験結果は、(ロ)A 付属資料 1 の 3.5.2.1 章に記載した通りである。外容器の変形は一次衝撃面、補強リング及び二次衝撃面に発生したものの局所の変形にとどまった。また、クラムシェルに大きな変形はなく、写真(ロ)A 付 1-4 に示したように模擬燃料集合体も大きな変形はなく、燃料集合体外寸法が 213.8 mm から最小 209.6 mm まで減少し、燃料棒ギャップが 3.1 mm から局所的に最大 4.8 mm に広がった程度であった。また、燃料棒に亀裂や破損がないことが確認された。

2.2. Prototype-2

Prototype-2 試験⑤及び⑥の試験結果は、(ロ)A 付属資料 1 の 3.6.2.4 章に記載した通りである。試験⑤については、脚部とフォークリフトポケットは変形したが、外容器の胴体部はほとんど変形しなかった。試験⑥については、外容器のヒンジが衝突面となったが、ヒンジ及びヒンジボルトは破損せず、外容器は殆ど変形しなかった。Prototype-2 に対しては試験⑤、⑥も含めて4回の落下試験Ⅰを実施したが、燃料棒に亀裂や破損は見られなかった。

以上のように Prototype1,2 に対して実施された水平及び傾斜落下の結果からは、燃料棒に亀裂、破損はなく、その兆候となるような大きな変形等も認められなかった。なお、Prototype-1 及び 2 と製品版の Traveller XL 型輸送物では、水平、傾斜落下に影響する設計変更として、側面の発泡ポリウレタンの密度が 11pcf から 10pcf に変更されている。燃料集合体の加速度は発泡ポリウレタン密度が高い方が大きくなるため、Prototype1 及び 2 に対する評価は燃料棒亀裂という観点からは保守的であるといえる。

3. NFI 製燃料集合体の水平、傾斜落下時の耐性について

ここで、NFI 製燃料集合体の水平、傾斜落下時において、燃料棒に破損が生じるか否かを、圧縮及び曲げの観点から考察する。

3.1. NFI 製燃料棒の圧縮耐性について

本節では、NFI 製燃料棒の圧縮耐性を示すものとして、過去に実施した燃料棒圧縮試験の結果を示す。試験体系を図(ロ)A 付 4-1 に示す。被覆管、支持格子は 17x17 型 (タイプ 57) のものを用いている。模擬ペレットは UO_2 ペレットより変位しやすい [] を採用しており、保守的な評価となっている。試験片長さは被覆管、ペレットともに [] とした。なお、圧縮試験における最大荷重は [] に設定した。

燃料棒圧縮試験結果を図(ロ)A 付 4-2 に示す。最大荷重の []、線荷重で [] まで圧縮しても被覆管に亀裂、破損は生じなかった。なお、各 NFI 製燃料集合体タイプで耐線圧縮荷重にわずかに差はあるものの、被覆管材料は各 NFI 製燃料集合体タイプで同等であるため、その差は小さいと考えられる。そのため、以降の評価では [] を用いて評価を行う。

ここで、水平、傾斜落下時に燃料棒が圧縮荷重によって亀裂、破損が生じるか考察する。水平、傾斜落下時に落下方向の最下部の燃料棒に対して、同列の燃料棒の荷重(例えば 17x17 型であれば 16 本分の燃料棒) が負荷した場合の圧縮荷重を考える。最下部の線荷重が [] に達するのに必要な加速度を表(ロ)A 付 4-1 に示す。Prototype-1 の試験①においてクラッシュに生じる加速度が 555G(解析値、(ロ)A-付属資料 5 参照)であることを考慮すると、NFI 製燃料集合体の燃料棒が圧縮荷重で破損するおそれはない。

3.2. NFI 製燃料棒の曲げ耐性について

本節では、NFI 製燃料棒の曲げ耐性を示すものとして、過去に実施した燃料棒横方向変位試験の結果を示す。試験体系を図(ロ)A 付 4-3 に示す。被覆管、支持格子は 17x17 型 (タイプ 57) のものを用いており、支持格子間スパンは 17x17 型 (タイプ 57) の [] 及び第 [] を再現している。また、変位させる燃料棒の上下の格子には被覆管及びシンプル管を挿入している。

燃料棒横方向変位試験前後の外観写真を写真(ロ)A 付 4-1 に示す。燃料棒の変位量が [] に達するまで押し込んだが、燃料棒に亀裂、破損は認められなかった。なお、各 NFI 製燃料集合体タイプで曲げ耐性にわずかに差はあるものの、被覆管材料は各 NFI 製燃料集合体タイプで同等であるため、その差は小さいと考えられる。そのため、以降の評価では変位量 [] を用いて評価を行う。

Prototype-1 の傾斜落下試験語に確認された集合体の変形量は、燃料集合体外寸法が 213.8 mm から最小 209.6 mm まで減少、燃料棒ギャップが 3.1 mm から局所的に最大 4.8

mm に拡大した程度であり、燃料棒横方向変位試験での変位量 に対して非常に小さい変形量といえる。

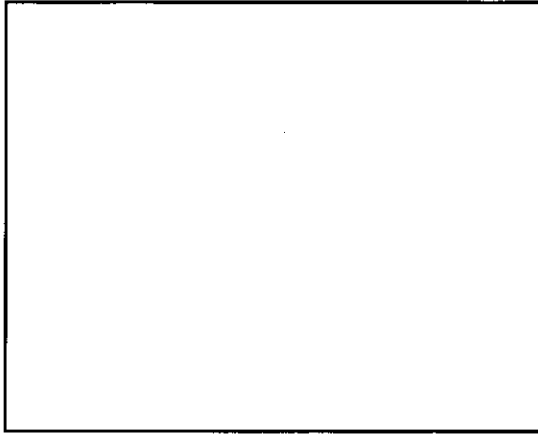
また、模擬燃料集合体と NFI 製燃料集合体で、燃料棒と支持格子の基本的な構造に違いはなく、燃料棒同士の干渉や支持格子及びクラムシエルの支えにより、水平、傾斜落下時の変形量が 以上に達することはないと考えられる。以上のことから、NFI 製燃料集合体を Traveller XL 型輸送容器に収納して水平、傾斜落下させても燃料棒曲げによって燃料棒に亀裂、破損するおそれはない。

4. まとめ

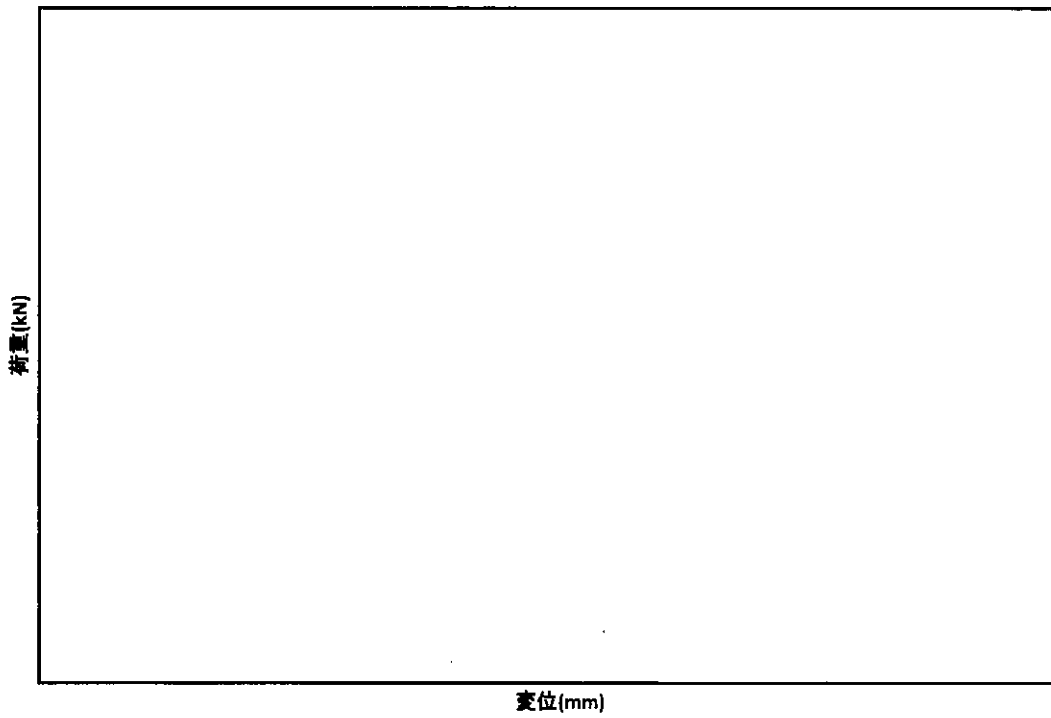
Prototype1,2 に対して実施された水平及び傾斜落下の結果からは、燃料棒に亀裂、破損はなく、その兆候となるような変形等も認められなかった。

過去に実施した NFI 製燃料棒に対する試験結果から、NFI 製燃料棒の圧縮及び曲げ耐性を確認したところ、水平、傾斜落下させた場合に生じる圧縮荷重や燃料棒曲がりによって燃料棒に亀裂、破損するおそれはないことがわかった。

以上のことから、NFI 製燃料集合体に対して水平、傾斜の落下姿勢で落下試験 I を実施した場合、燃料棒に亀裂、破損が発生するおそれはない。



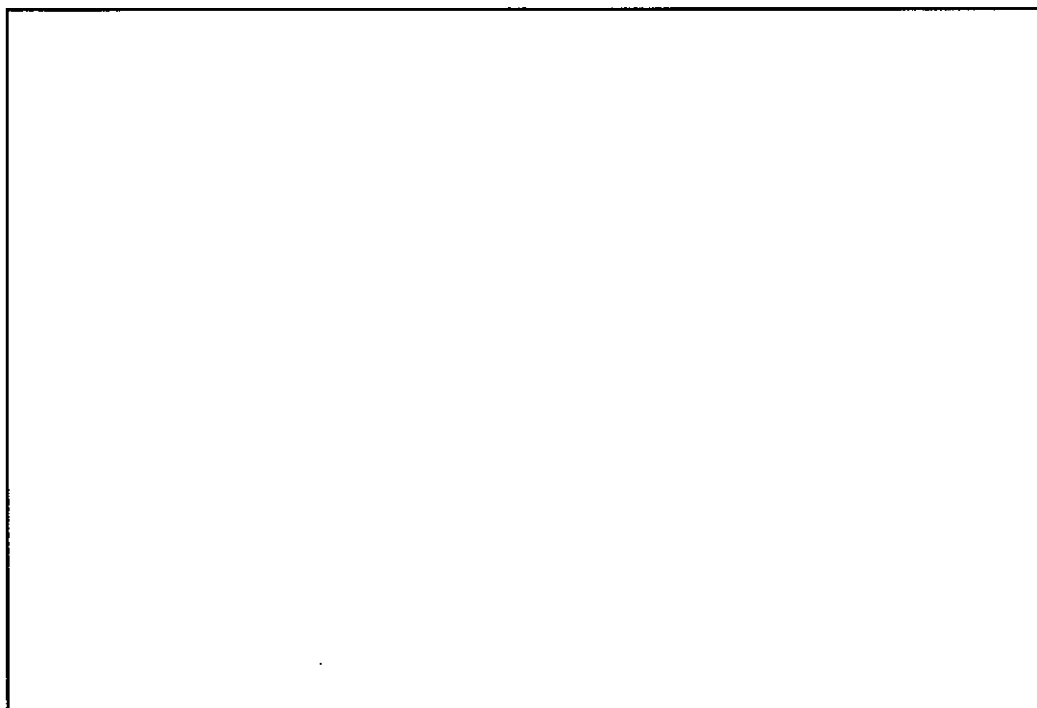
図(口)A 付 4-1 燃料棒圧縮試験の試験体系図



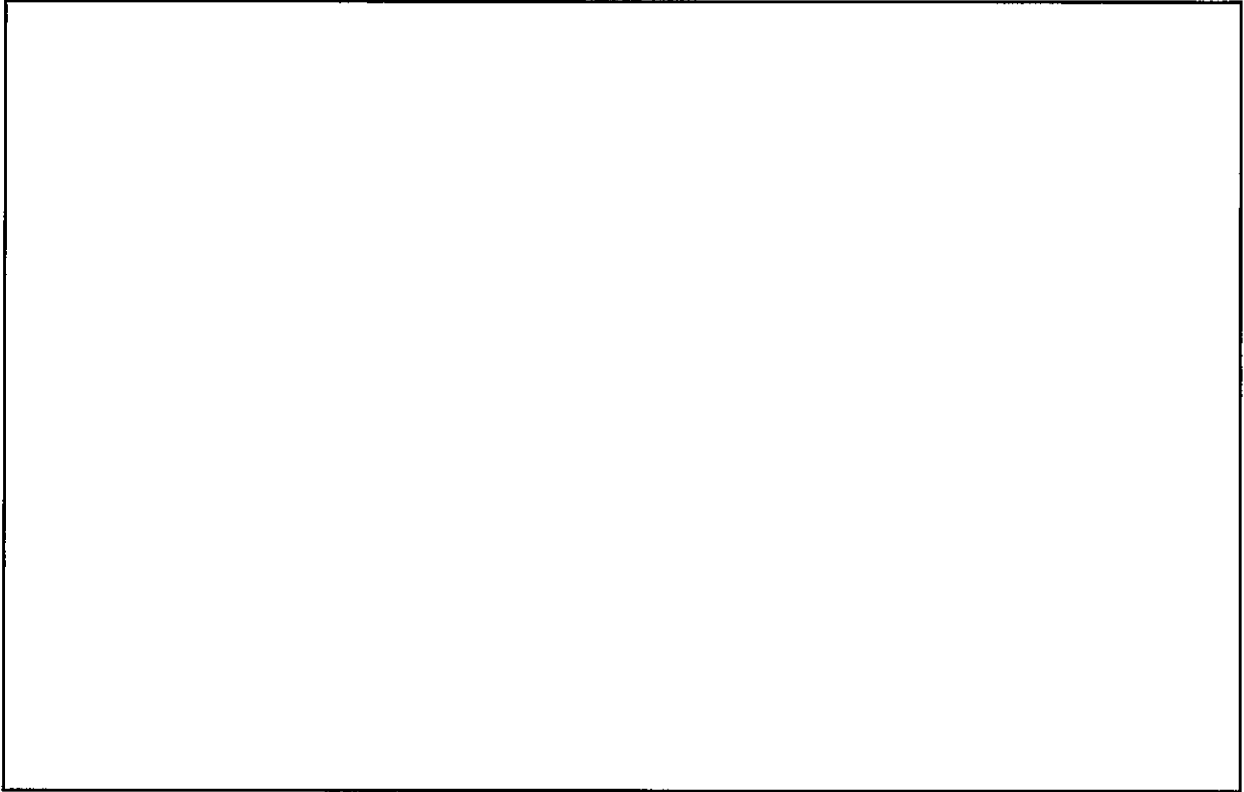
図(口)A 付 4-2 燃料棒圧縮試験結果

表(ロ)A 付 4-1 線荷重 2.2kN/mm に達するのに必要な加速度

	14×14 (7支持格子)	14×14 (8支持格子)	15×15	17×17 (タイプ64)	17×17 (タイプ57)
1本あたりのウラン重量(kg)					
1mmあたりのウラン重量(kg)					
1mmあたりの被覆管重量(kg)					
1mmあたりの燃料棒重量(スタック部)(kg)					
同列の燃料棒の荷重が負荷した場合に線荷重が2.2kN/mmに達するのに必要な加速度(G)					



図(ロ)A 付 4-3 燃料棒横方向変位試験の試験体系図



変位試験前

変位試験後

写真(口)A 付 4- 1 燃料棒横方向変位試験前後の外観

(口)A 付属資料 5

9m 垂直落下時における加速度に係る検討

1. はじめに

本付属資料では、Traveller XL 型輸送物を 9m 垂直落下させた場合に燃料集合体にかかる加速度を算出する。

2. Prototype 容器に対する落下解析

2.1. Prototype 容器に対する落下試験モデル

本解析では LS-DYNA Ver960(単精度、MPP)を用いた。LS-DYNA は有限要素法による空間の離散化と、中心差分に基づく陽的時間積分法をベースとした非線形問題解析用の汎用プログラムである。解析対象としては、衝突・衝撃問題等の動的解析から、塑性加工解析等の準静的解析までの幅広い分野をカバーしている。また静解析、動解析のための陰解法ソルバーも内蔵している。

LS-DYNA における Prototype 容器のモデル図を図(ロ)A 付 5-1~図(ロ)A 付 5-3 に示す。モデルには、ステンレス鋼、発泡ポリウレタン等の物性データが入力されている。また、外容器とクラムシエルの接続部であるショックマウントは離散要素 (バネ) としてモデル化している。また、燃料集合体については上下部ノズルを除いた領域については剛体としている。

2.2. 検証

2.2.1. 外容器の変形

作成した Prototype1 容器に対する落下試験モデルについて、以下の 3 ケースについて、外容器の変形挙動を比較した。

- ・ Prototype1 試験① 落下試験 I 14.5°傾斜落下
- ・ Prototype1 試験② 落下試験 I 71°コーナー落下
- ・ Prototype2 試験② 落下試験 II 20°傾斜落下

計算値と実測値の比較を図(ロ)A 付 5-4~図(ロ)A 付 5-6 及び表(ロ)A 付 5-1 に示す。落下試験の衝突面に関して、各試験の外容器の変形挙動はよく一致していることが確認できる。

2.2.2. 加速度

Prototype1 の試験①については、外容器及びクラムシエルに加速度計を取り付け、落下時の加速度を測定した。加速度計の取り付け位置を図(ロ)A 付 5-7 に示す。加速度の測定結果と解析結果の比較を図(ロ)A 付 5-8~図(ロ)A 付 5-10 に示す。

外容器の加速度 (図(ロ)A 付 5-8) については、解析結果が 1,300G であるのに対し、測定値は 945G 以上 (レンジオーバー) であった。測定値がレンジオーバーしたため、正確な比較はできないが、ともに 945G を超える値であった点は一致していた。

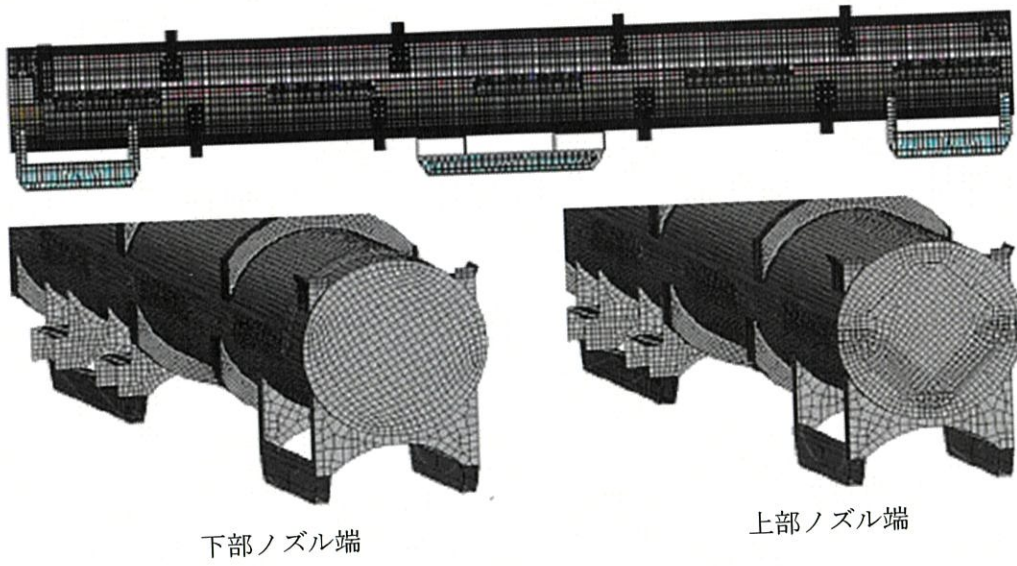
クラムシェル上部ノズル側 (図(ロ)A 付 5-9) については、解析結果が 555G であるのに対し、測定値は 525G 以上 (レンジオーバー) であった。測定値がレンジオーバーしたものの、波形が非常によく一致していることから考えて、測定結果と解析結果はよく一致していると考えられる。

クラムシェル下部ノズル側 (図(ロ)A 付 5-10) については、解析結果が 155G であるのに対して、測定結果が 172G でありほぼ一致した結果が得られた。

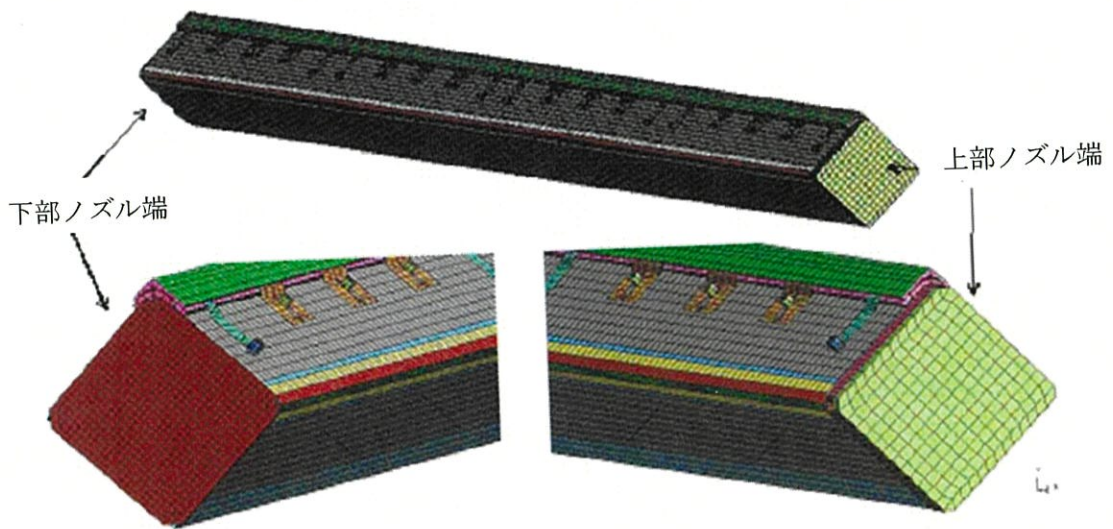
以上のように、外容器の変形及び加速度の試験結果と解析結果の比較結果から、Prototype の LS-DYNA モデルは試験結果をよく再現できているといえる。

2.3. Prototype 容器の 9m 垂直落下時の最大加速度について

上記で作成した Prototype の LS-DYNA モデルを用いて、9m 垂直落下の条件で、落下試験解析を実施した。落下試験解析の結果から集合体加速度の結果を 図(ロ)A 付 5-11 に示す。下部ノズル側から垂直落下させた場合の加速度は 128G (下部ノズル下端) であった。



図(ロ)A付5-1 Prototype 容器の外容器モデル

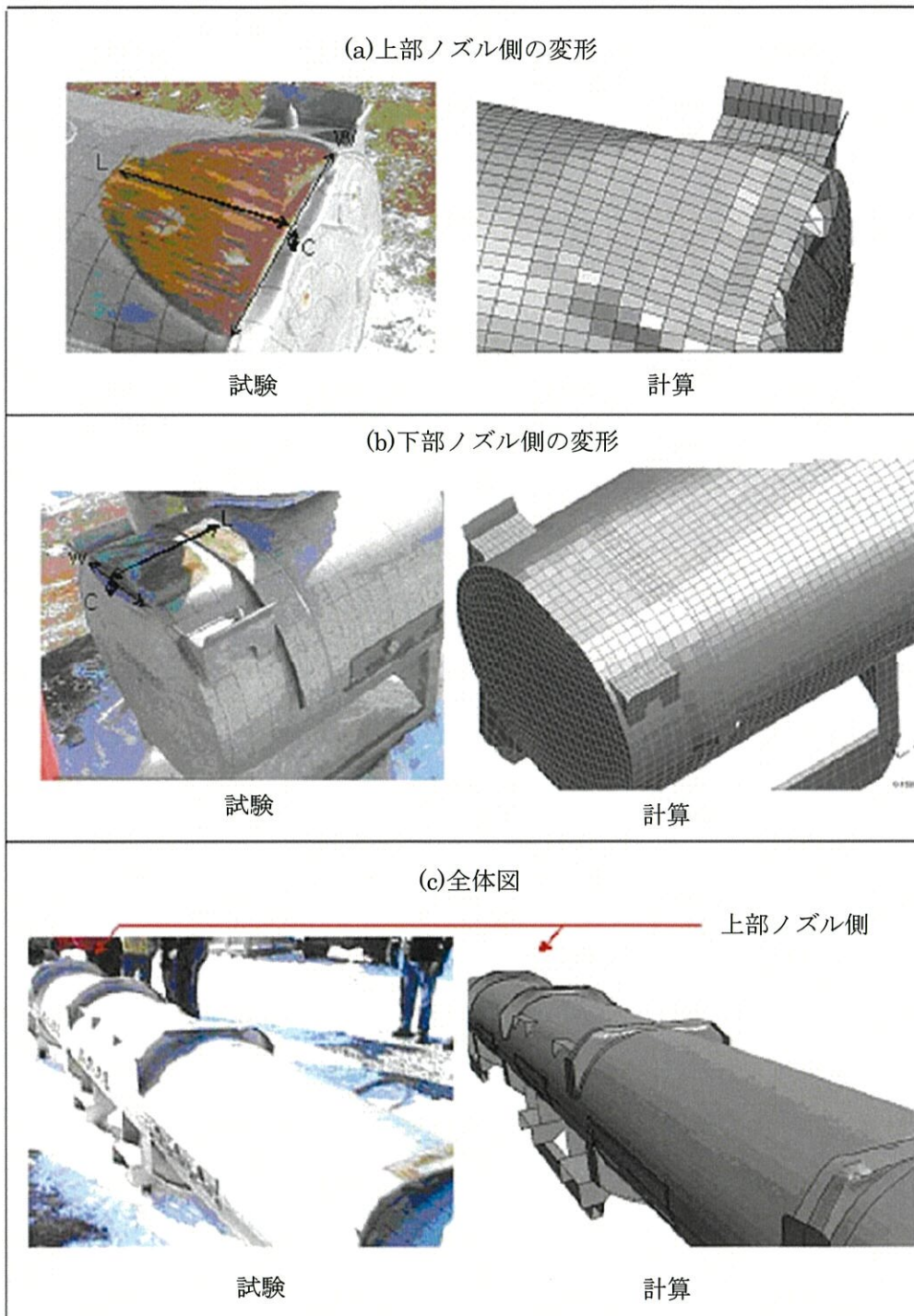


図(ロ)A付5-2 Prototype 容器のクラムシェルモデル



図(ロ)A付5-3 Prototype 容器の燃料集合体モデル

(ロ)A 付属 5-4

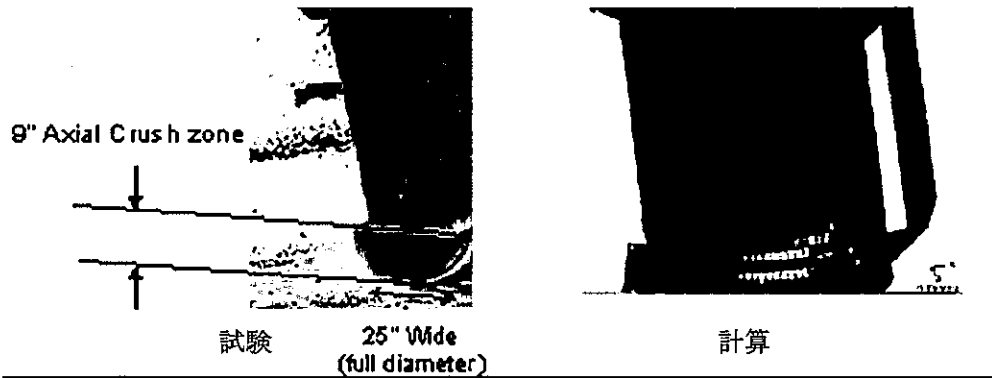


図(ロ)A 付 5- 4 Prototype1 試験①の変形挙動比較

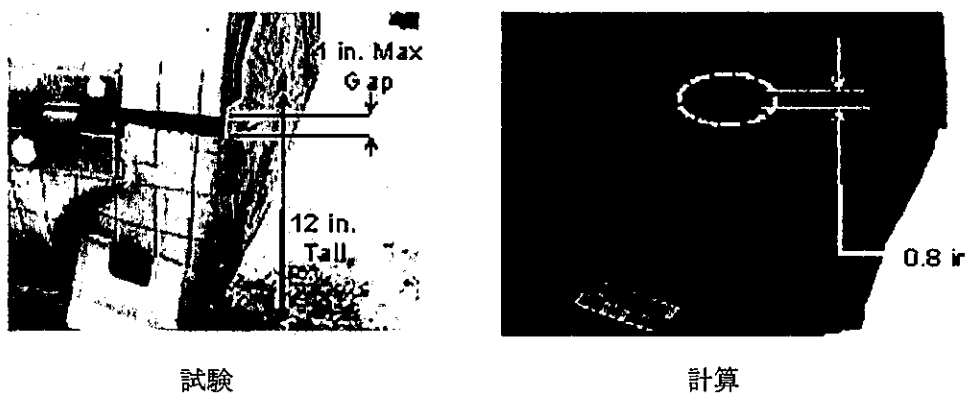
表(ロ)A付5-1 Prototype1 試験①の変形量比較

	測定値(mm)	解析値(mm)
上部ノズル側		
L	229	302
W	305	371
C	38	42
下部ノズル側		
L	292	302
W	268	330
C	19	38

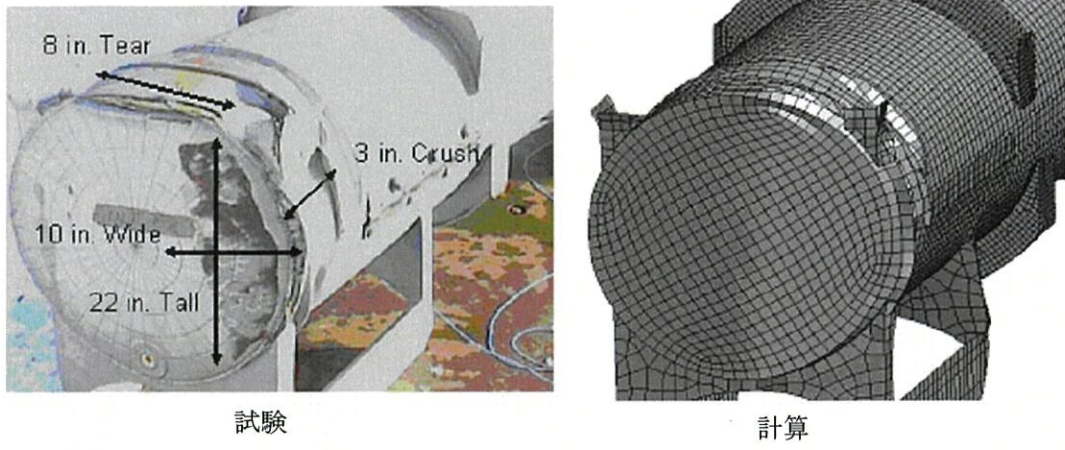
(a)上部ノズル側の変形 (その1)



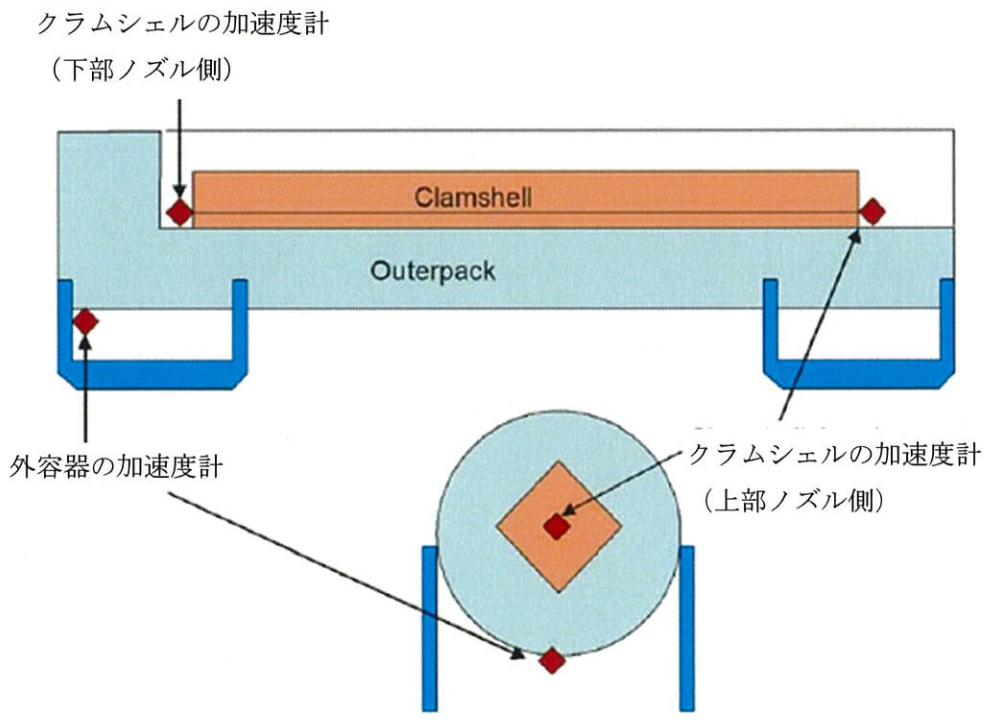
(b)上部ノズル側の変形 (その2)



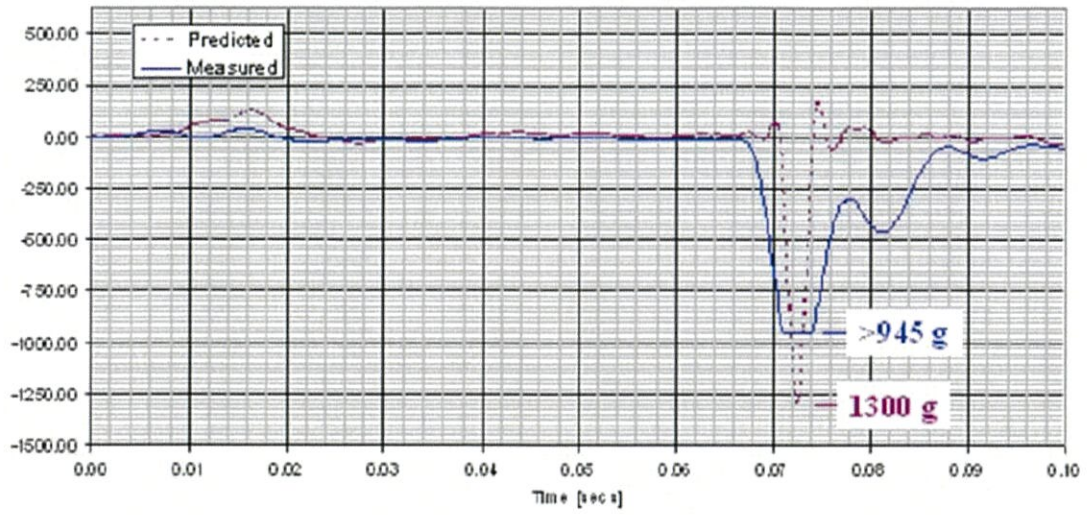
図(ロ)A付5-5 Prototype1 試験②の変形挙動比較



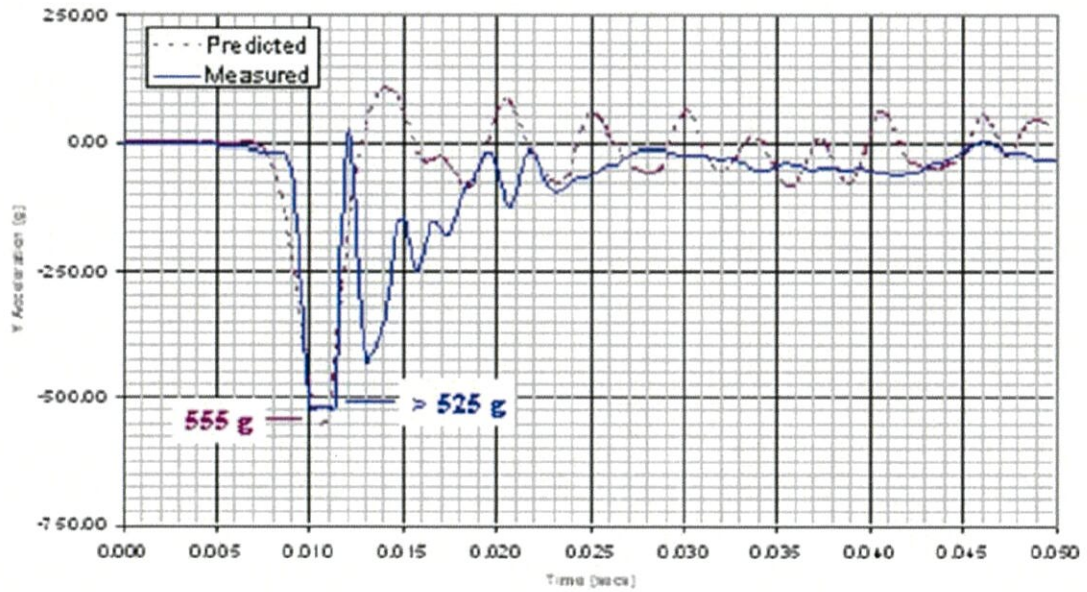
図(ロ)A 付 5-6 Prototype2 試験③の変形挙動比較



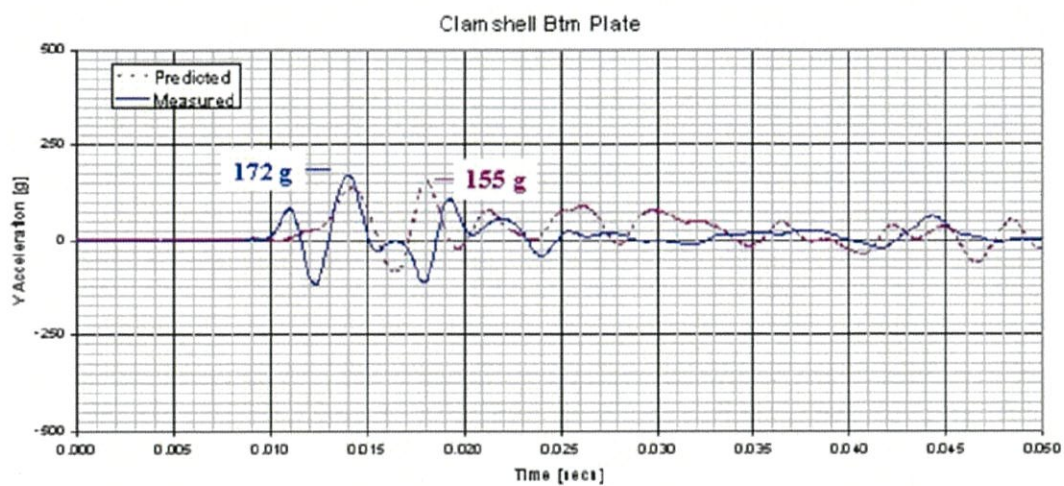
図(ロ)A 付 5-7 Prototype1 試験①における加速度計位置



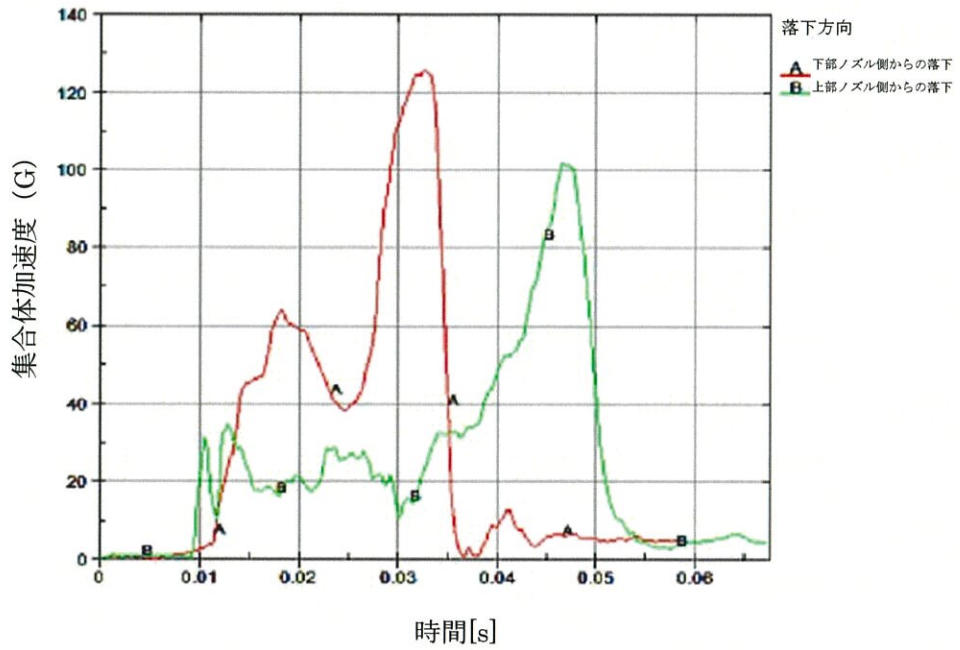
図(ロ)A 付 5- 8 Prototype1 試験①における加速度の計算値と測定値の比較 (外容器)



図(ロ)A 付 5- 9 Prototype1 試験①における加速度の計算値と測定値の比較 (クラムシェル上部ノズル側)



図(ロ)A 付 5- 10 Prototype1 試験①における加速度の計算値と測定値の比較 (クラムシェル下部ノズル側)



図(ロ)A 付 5- 11 Prototype における 9m 垂直落下時の集合体加速度
 ※下部ノズル下端及び上部ノズル上端の加速度

3. 製品版 Traveller XL 型輸送物の最大加速度の算出

3.1. Prototype から製品版への設計変更点

垂直落下時の燃料集合体加速度に影響する項目として、Prototype から製品版の発泡ポリウレタン密度が以下のように変更されている（図(ロ)A付 5-12 参照）。

- ・外容器胴体部：11pcf¹から10pcf に変更
- ・外容器両端部：16pcf から20pcf に変更。
- ・枕型構造体：7pcf から6pcf に変更。

3.2. 製品版 Traveller XL 型輸送物の最大加速度

図(ロ)A-5～A-7 に示したように、発泡ポリウレタンの密度は圧縮強度に影響する。発泡ポリウレタン密度が変化しても、垂直落下時の Traveller XL 型輸送物の落下速度及び接触面積は一定であるとする、発泡ポリウレタンの圧縮強度は歪量に対してほぼ一定の圧縮強度をもつため（図(ロ)A-5～図(ロ)A-7 参照）、作用時間は圧縮強度に反比例する。よって、以下の式に示すように、発泡ポリウレタンの圧縮強度が大きくなると、作用時間が小さくなり、その結果加速度は大きくなる。

$$mv = F_1 t_1 = F_2 t_2$$

$$\alpha_1 = v/t_1 = F_1/m$$

$$\alpha_2 = v/t_2 = F_2/m$$

mv ：運動量

F_1, F_2 ：発泡ポリウレタンの圧縮強度

t_1, t_2 ：作用時間

α_1, α_2 ：加速度

図(ロ)A付 5-12 に示したように、Traveller XL 型輸送物の端部は3つの密度をもつ発泡ポリウレタンからなる。Prototype から製品版の Traveller XL 型輸送物への設計変更として、枕型構造体の密度を7pcf→6pcf に低下させているが、ここでは保守的に外容器両端部が16pcf→20pcf に増加した点のみを考慮して、製品版 Traveller XL 型輸送物の最大加速度を計算する。

製品版 Traveller XL 型輸送物の9m 落下時の下部ノズル下端の加速度 α は以下の通りとなる。

¹ヤードポンド法表記の密度の単位、1pcf = 16.02 kg/m³

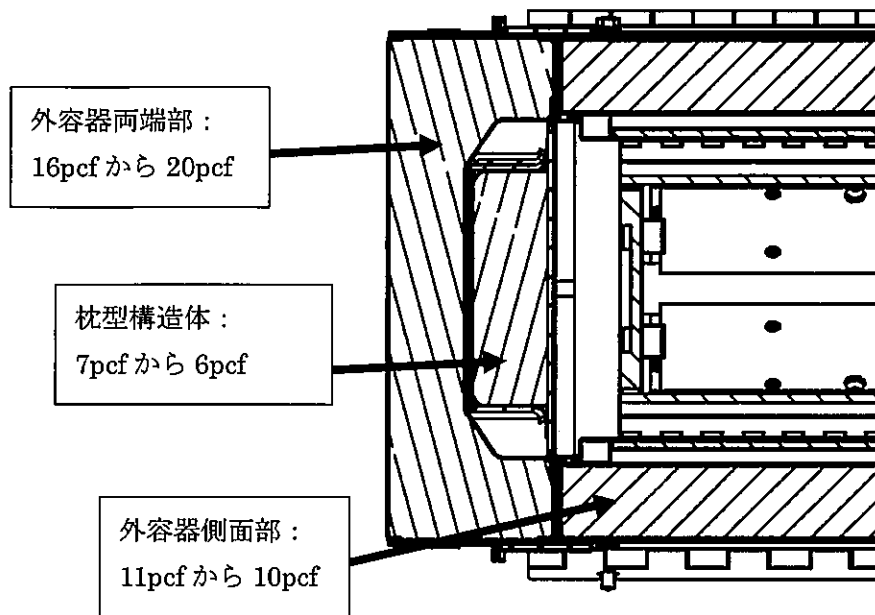
$$\alpha = \alpha_{proto} \times \frac{\sigma_{20pcf}}{\sigma_{16pcf}} = \boxed{} = \boxed{} (G)$$

α_{proto} : Prototype の 9m 垂直落下時の下部ノズル下端の加速度

σ_{20pcf} : 発泡ポリウレタン (20pcf) の 40%歪時²の圧縮強度(psi)

σ_{16pcf} : 発泡ポリウレタン (16pcf) の 10%歪時の圧縮強度(psi)

² 10%歪 (約 1,950psi) < 40%歪 (約 2,100psi) であるため、保守的に 40%歪時の圧縮強度を用いて計算する。



図(ロ)A 付 5-12 下部ノズル側端部周辺のポリウレタン密度 (Prototype 容器から製品版の変更点)

(口)A 付属資料 6

6. 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(FAP-3)、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(FAP-3)とは、株式会社構造システムが開発した線材（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

本解析モデルの概要図を図 4.1 に示す。本モデルでは Traveller XL 型輸送物について、円筒状のはり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、及び外容器に充填された発泡ポリウレタンを考慮している。なおクラムシェル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。このはり要素に対して輸送物の最大重量(kg)を長さ方向に均等荷重として付加し、固有振動数の解析を行った。

本モデルでは脚部の位置のみに拘束点（図 4.1 の赤丸で示した 2 点）を設けた。なお拘束点はすべて移動拘束のみであり、回転拘束はかけていない。実際の輸送の際には、固縛機材を用いてコンテナや他の容器と全長に渡って固定することを考えると、本モデルの固有振動数は実体より小さくなっている。

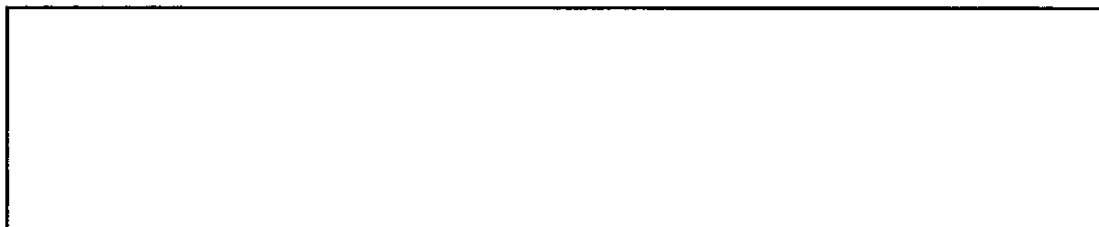


図 4.1 モデル概要図

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と比べ大きな値となり、共振するおそれがないことが確認出来た。

(ロ)-B 熱解析

B.1 概要

B.1.1 輸送物の熱設計

本輸送容器は、ステンレス鋼製の外容器及びアルミニウム合金製のクラムシェル各 1 個から構成される。

外容器はステンレス鋼製の二重壁構造であり、落下時の衝撃及び火災時の熱の流入を緩和するため二重壁内に発泡ポリウレタンが充填している。

クラムシェルはアルミニウム合金製の L 字型メインフレーム、2 枚のメイン扉、上部ドア、ボトムプレート及びトッププレートから構成される。L 字型メインフレームと 2 枚のメイン扉は、ヒンジで接続される。

クラムシェルは、収納物の装荷直後に閉じられ、通常の取り扱い時の収納物の損傷を防止するとともに、特別の試験条件下において、燃料棒の曲がり、格子拡大、及び損傷を抑制し、中性子吸収の機能を有している。

外容器外表面には可融栓を設けており、高温下では溶けて二重壁内の圧力上昇を防ぐ。

本輸送物の熱設計上の特徴を以下に示す。

- ・ 収納物は未照射ウラン新燃料集合体であり、崩壊熱は無視できるほど小さい。
- ・ 収納物の崩壊熱がほとんどないため、特別な補助冷却システム等は有していない。

B.1.2 輸送物の熱解析

本解析では、本輸送物が規則及び告示に規定される A 型核分裂性輸送物に係る技術上の基準に適合することを示す。

(a) 一般の試験条件

本輸送物は A 型輸送物であるため、B 型輸送物の一般の試験条件下で要求される条件「38℃で太陽放射を 12 時間ごとに受ける環境下に 1 週間置く」は該当しない。しかし、核分裂性輸送物であるため、特別の試験条件下における耐火試験前に要求される同様の条件「38℃で太陽放射を 12 時間ごとに受ける環境下に温度が一定になるまで置く」に該当することから、環境温度 38℃、太陽放射下で輸送物表面温度が一定になるまで置くとした条件で評価を行う。

(b) 特別の試験条件

- イ. 38℃で太陽放射を 12 時間ごとに受ける環境下に温度が一定になるまで置いた後、0.9 の周囲放射率を持つ 800 ℃の熱放射環境に 30 分間さらされる。この場合、試験中も輸送物は太陽放射を受ける。この際設計上最大となる内部発熱を考慮する。
- ロ. 試験後の輸送物は、38℃の大気中において 12 時間ごとに太陽放射を受ける。この際、設計上最大となる内部発熱を考慮し、人為的な冷却は行わない。

B.2 材料の熱的性質

輸送容器の構成材料は表(イ)- 1 に示す通りである。輸送容器の主要構成材料の熱的性質を表(ロ)B- 1に示す。また、燃料集合体の主要材料の熱的性質を表(ロ)B- 2に示す。

B.3 構成要素の仕様

本輸送物の収納物である燃料集合体は、安全解析上想定される温度の範囲では安定的に固体でかつガス等の放出はない。このため、本輸送容器には弁及び安全弁は設けていない。また、収納物を加圧もしくは減圧して収納する必要がないことから、最大使用圧力に関する要件は該当しない。外容器のフランジ部に使用しているガスケットは不連続であるため、外容器は密封構造ではない。

表(ロ)B-1 容器主要材料の熱的性質 (参考文献(1))

材料	密度	熱伝導率	比熱	参考 (溶融温度)
ステンレス鋼(SUS304)	7.9g/cm ³	14.2 W/m·K	0.5 J/g·°C	1,400~1,455°C
アルミニウム合金	2.8g/cm ³	167 W/m·K	0.88 J/g·°C	582~652°C
超高分子量ポリエチレン	0.932-0.945g/cm ³	0.42W/m·K	2.2J/g·°C	125~138°C ⁽¹⁾
発泡ポリウレタン	0.166g/cm ³	0.041W/m·K	1.15J/g·°C	— ⁽²⁾
耐火繊維フェルト断熱材	0.097g/cm ³	0.06W/m·K	1.0J/g·°C	1,260°C

(1) 高い粘性をもつため、溶融点を超えても液化せず、気化温度 (349°C) に達するまで形状を保つ。

(2) 発泡ポリウレタンは熱硬化性材料であり、溶融前に分解する。

表(ロ)B-2 燃料集合体主要構成材料の熱的性質

材料	密度	熱伝導率	比熱	参考 (溶融温度)
ステンレス鋼 (SUS304L)	7.8g/cm ³	14.2 W/m·K	0.5 J/g·°C	1,400~1,455°C
718 合金	8.3g/cm ³	14.9 W/m·K	0.44 J/g·°C	1,354~1,413°C
ジルカロイ-4 ジルコニウム合金	6.5 g/cm ³	21.5 W/m·K	0.285 J/g·°C	1,782°C 1,796°C
二酸化ウラン	10.4~10.7 g/cm ³	5.86 W/m·K	0.237 J/g·°C	2,750°C

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℃、太陽放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℃、太陽放射下で輸送物表面温度が一定になるまで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、外板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、太陽からの放射伝熱量は、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。したがって、本解析では、輸送物の寸法を直径 0.635 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

燃料棒内の全空隙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

該当しない。

B.4.2 最高温度

(1) 解析項目

一般の試験条件下での太陽放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 は次式より得られる。

ここで、 q'' : 太陽放射熱流束 400 W/m²

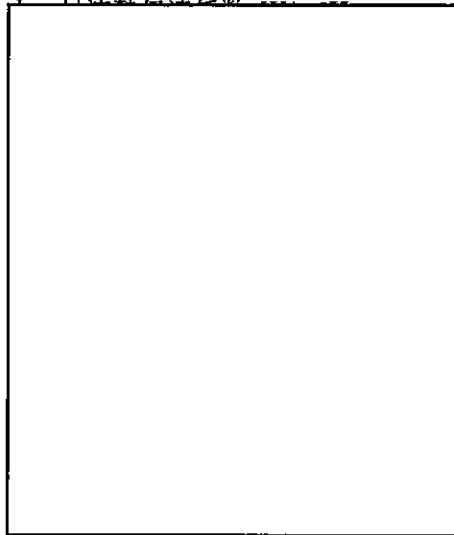


自然対流熱伝達係数 h_c は、水平円筒の自然対流の式（参考文献(2)）から次式で表される。



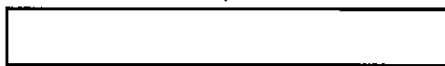
(3)

ここで、



である。

放射熱伝達係数 h_r は次式で表される。



ここで、



式(1)~(4)から T_s を求めると、

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

輸送容器の主要構造材であるステンレス鋼、アルミニウム合金は \square °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

輸送物内収納物からの崩壊熱は無視できるほど小さいため、周囲温度を -40°C とした場合、輸送物の最低温度は周囲温度に等しく -40°C である。(ロ)A.4.2 で述べたように、主要構造材であるステンレス鋼、アルミニウム合金は -40°C となっても、脆性破壊やじん性低下がなく、使用されている材質が機能を損なうことはない。

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。輸送容器自体は密封構造となっておらず、圧力上昇は発生しないため、ここでは温度上昇による燃料棒の内圧を次式で計算する。なお、燃料棒の密封溶接は空調の効いた屋内で行われるが、ここでは密封時の温度を保守的に 0°C とする。

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

ここで

P : 最大内圧

P_0 : 常温時の内圧 Pa

T : 最高温度 $^{\circ}\text{C}$

T_0 : 0°C

燃料棒内圧は種類ごとに異なるが、ここでは最も高い Pa とする。

(1)式を用いて最大内圧を計算すると燃料棒では Pa となる。したがって、燃料棒の応力解析には、内圧が Pa、外圧が 1.01×10^5 Pa とし、内外差圧は Pa を用いる。

B.4.5 最大熱応力

一般の試験条件下において、A型輸送物に対する熱的要件が無いこと、本輸送物の収納物の崩壊熱が無視できるほど小さいことから、本輸送物各部の温度は等しく、温度分布を生じない。

そのため、輸送物各部に熱応力は生じない。

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以下に纏める。

- ・ 最高温度

輸送物各部の最高温度は ℃である。主要構造材であるステンレス鋼、アルミニウム合金に劣化は生じない。

- ・ 最低温度

輸送物各部の最低温度は周囲温度と等しく-40℃である。主要構造材であるステンレス鋼、アルミニウム合金に脆性破壊やじん性低下は生じない。

- ・ 最大内外差圧

本輸送物の密封装置は燃料棒であり、燃料棒の最大内外差圧は約 MPa である。

- ・ 最大熱応力

本輸送物各部の温度は等しく温度分布を生じないため、輸送物各部に熱応力は生じない。

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	<input type="checkbox"/> MPa	

解析基準は、熱的な評価としては実験（参考文献(3)）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°Cのときの被覆管の耐力とする。

解析計算は、以下の3つの状態を連続して考慮して輸送物の温度を評価する。

(1) 耐火試験の初期条件

輸送物を 38°Cで太陽放射を 12 時間ごとに受ける環境下に温度が一定になるまで置く。

(2) 耐火試験の条件

輸送物を 800 °Cの熱放射環境に 30 分間置く。この場合、試験中も輸送物は 12 時間ごとに太陽放射を受ける。

(3) 耐火試験後の条件

輸送物を 38°Cで太陽放射を 12 時間ごとに受ける環境下に置いて冷却する。期間は、評価上着目する部位が最高温度に到達することが確認できるものとする。

耐火試験は、落下試験に供した認証試験ユニット (CTU) を、800°Cの環境に 30 分以上配置して、輸送容器内の到達温度を測定する。また、38°C環境、太陽放射の影響については、同環境下に輸送物を配置した場合被覆管の表面温度°Cに到達する点を考慮し ((ロ)B.4.2 参照)、耐火試験の到達温度に単純に°Cを足すことで評価する。

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、落下試験に供した認証試験ユニット（CTU）に対して実施した。試験条件として、800℃の環境に30分以上輸送容器を配置するため、燃焼プールを使用した。

耐火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、試験後の輸送容器及び収納物の損傷状態を検査した。また、本輸送物の収納物は未照射ウラン燃料集合体であり、崩壊熱は無視できるほど小さいため、耐火試験時の収納物は非発熱の模擬燃料集合体1体とした。模擬燃料集合体の詳細仕様は「(ロ)A 付属資料1」に示す。

B.5.2 輸送物の評価条件

CTUに対する落下試験は表(ロ)A-12に示すように3種類の落下試験を実施した。試験①の自由落下（1.2m落下）では、衝突面や上側ケースの補強リングが局所的に変形したものの、変形は小さかった。試験②の落下試験Ⅰ（9m落下、垂直落下）では、輸送容器に局所的な変形が生じたが、変形量は12.7mmと小さかった。試験③の落下試験Ⅱ（1mターゲット落下）では局所的な凹みが生じたが、貫通孔は発生しなかった。耐火試験終了後に輸送容器を開封し、容器内部を確認したところ、内部構造部品に大きな損傷は生じなかった。

以上の事から、落下試験により、耐火試験での温度上昇につながるような変形、損傷は生じなかった。

耐火試験では、800℃を大幅に超えるプール火炎内にCTUを配置し、30分以上の耐火試験を実施した。なお、本輸送容器の収納物は未照射の燃料集合体であり、発熱する核燃料物質は含まない。したがって、輸送容器の表面温度が、周囲温度を超えて上昇することはない。

B.5.3 輸送物温度

耐火試験（(ロ)B 付属資料-1 フルスケールモデル耐火試験結果参照）では、耐火試験実施前の夜間に待機温度が氷点下近くまで低下したため、輸送容器をシートで覆い、ヒーターでテナント内温度を40～80℃に維持した。ただし、ヒーター加熱終了後から耐火試験開始までの間が1時間以上あり、この間に温度が低下したため、温度評価では燃料棒被覆管初期温度は周囲外気温度と同じ0℃とする。

容器内外部の温度は、熱電対、指向性火炎温度計(DFT)、放射温度計、粘着式サーモラベルに

より測定した。

熱電対は、輸送容器表面から 0.9m の位置に 12 箇所配置し、輸送容器外板に 6 箇所配置した。DFT は輸送容器外板に 4 箇所取り付け、その周辺の炎温度を測定した。熱電対及び DFT の取り付け箇所を図(ロ)B- 1 に示す。熱電対とデータロガーによる温度測定結果を表(ロ)B- 4 に示す。

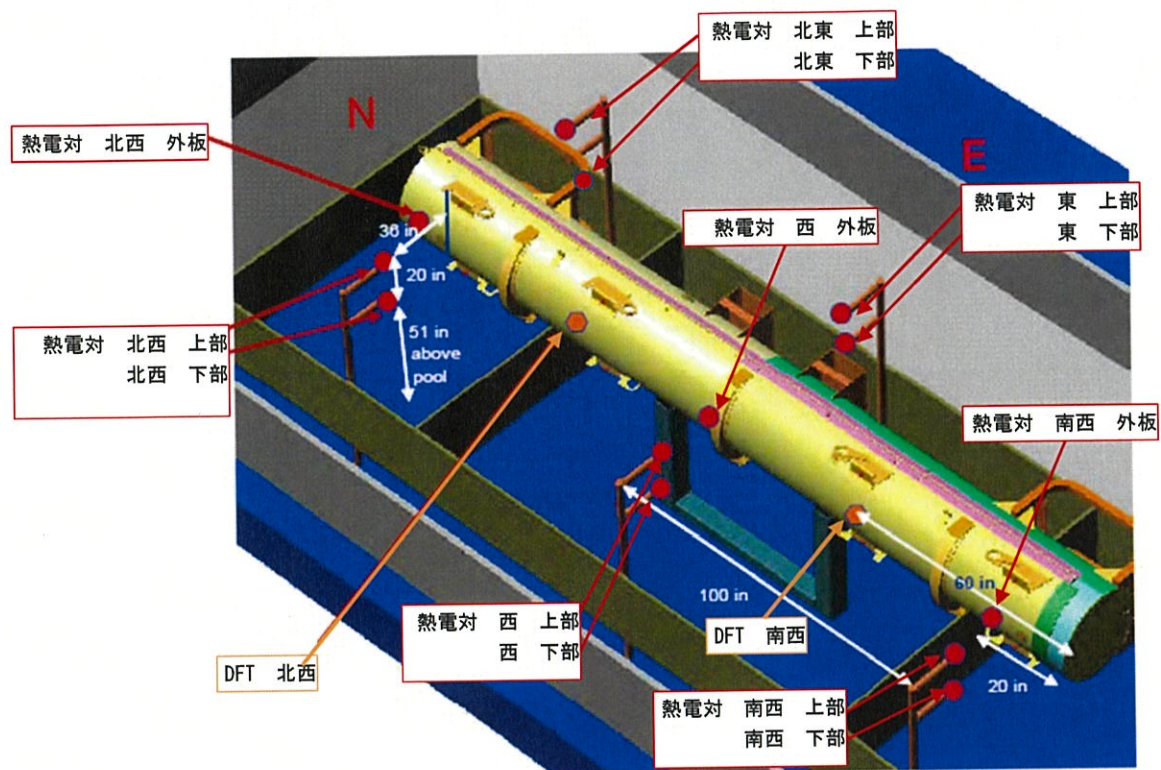
また、放射温度計を使用して、炎の外側からも温度データを収集した。1 台は輸送容器西側、もう 1 台は東側に配置した。放射温度計の測定データを表(ロ)B- 5 及び表(ロ)B- 6 に示す。

30 分平均温度について各測定箇所の平均をとると、熱電対については輸送容器の外板で 904℃、火炎内で 859℃、DFT については 833℃、放射温度計については 958℃であった。

粘着式サーモラベルは、物質の融点及び顔料の化学反応を利用したもので、最高到達温度を把握することができる。粘着式サーモラベルは CTU の内部に取り付けた。サーモラベルの取り付け箇所及び測定結果を図(ロ)B- 2 に示す。粘着式サーモラベルで測定した結果、クラムシェル内の最高温度は 104℃、外容器内面の最高温度は 177℃であった。

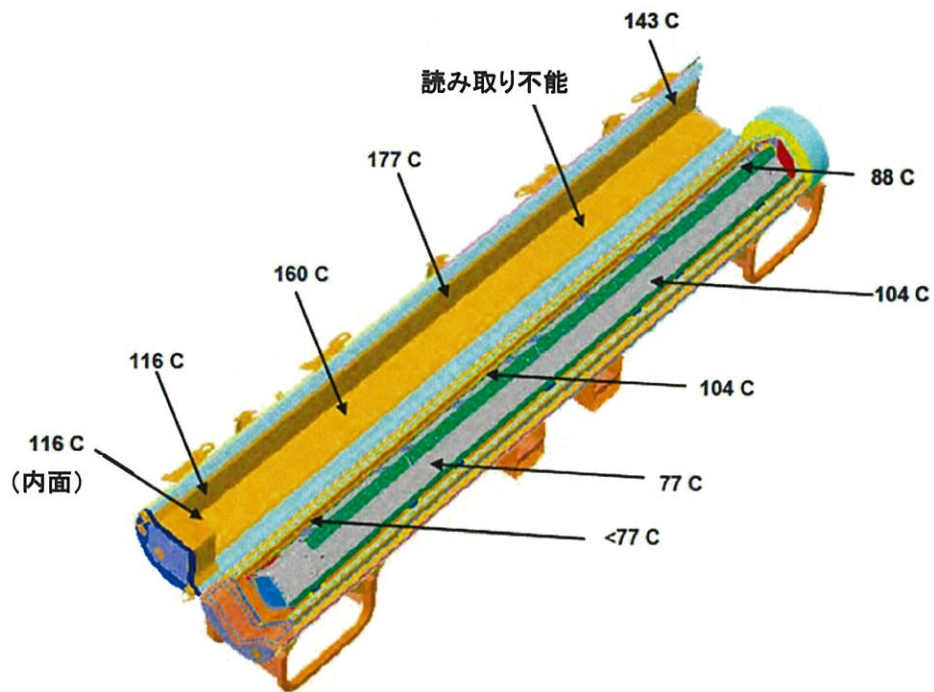
燃料棒の最高温度は、保守的に外容器内面の最高温度 177℃とし、太陽光を考慮した被覆管初期温度条件である □℃を加えて、□℃と計算される。

以上のことから、「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 □℃として評価する。



※作図の都合上、熱電対の「南東 上部」、「南東 下部」、「北東 外板」、「東 外板」、「南東 外板」、DFTの「DFT 北東」、「DFT 南東」は省略している。

図(ロ)B-1 熱電対及び指向性火炎温度計(DFT)の測定位置



図(ロ)B-2 粘着式サーモラベルの貼り付け位置と温度

表(ロ)B- 4 耐火試験中の温度変化表

熱電対、DFT の位置	30 分平均温度 (°C)	最高温度 (°C)	最低温度 (°C)
北東 下部	727	959	275
北東 上部	925	1,245	493
東 下部	926	1,155	489
東 上部	904	1,163	532
南東 下部	714	962	291
南東 上部	924	1,245	484
北西 下部	630	906	329
北西 上部	748	1,059	458
西 下部	997	1,162	640
西 上部	1,027	1,173	661
南西 下部	827	1,032	230
南西 上部	1,000	1,213	598
北東 DFT	804	907	454
南東 DFT	801	964	338
北西 DFT	854	1,016	541
南西 DFT	876	1,003	594
北東 外板	878	1,058	610
東 外板	917	1,073	699
南東 外板	903	1,088	542
北西 外板	725	990	492
西 外板	974	1,080	682
南西 外板	1,028	1,143	719

表(ロ)B- 5 放射温度計の測定結果 (西側)

(単位:°C)

着火後の経過時間	温度(北端)	温度(中央)	温度(南端)
0分	922	944	874
5分	1,047	973	1,025
10分	1,002	1,092	993
15分	937	847	987
20分	1,177	982	942
25分	1,062	1,073	1,058
30分	898	1,162	968
35分	525	460	484
40分	318	362	294

表(ロ)B- 6 放射温度計の測定結果 (東側)

(単位:°C)

着火後の経過時間	温度(北端)	温度(中央)	温度(南端)
0分	800	1,000	936
5分	978	1,062	837
10分	1,037	948	932
15分	842	996	835
20分	590	1,120	978
25分	552	969	1,048
30分	1,098	740	980
35分	データなし	データなし	データなし
40分	データなし	データなし	データなし

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「(ロ)-B.5.3 輸送物温度」で示したように、耐火試験中の燃料棒被覆管最高温度を安全側に °C として評価する。

主要な計算条件は次の通りである。

- a) 被覆管の内圧増加は温度上昇及びペレット-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、その比率は 0.07 以下である。そのため、半径方向応力 σ_r の効果は小さく無視できる。したが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 Pa (20 °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ペレット-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

P_0 : 初期内圧 Pa

V_0 : 初期ペレット-被覆管初期空間体積

V : 温度上昇後のペレット-被覆管初期空間体積

T_0 : 燃料棒密封時の温度 0 °C

T : 燃料棒最高温度 °C

初期ペレット-被覆管空間体積は被覆管内体積からペレット体積を差し引くと求まるので、以下の式で表せる。

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

ここで

$$D_c : \text{被覆管内径} \quad 9.40 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$8.36 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ 57})$$

$$L_c : \text{被覆管有効長} \quad 3.827 \text{ m} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$3.823 \text{ m} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ 57})$$

$$D_p : \text{ペレット外径} \quad 9.21 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$8.19 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ 57})$$

$$L_p : \text{燃料棒有効長} \quad 3.642 \text{ m} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$3.648 \text{ m} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ 57})$$

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、

$$V_0 = 2.296 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型})$$

$$1.767 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ 57})$$

また \square °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。

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

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

$D_p(\Delta T)$: 温度上昇後のペレット外径

$L_p(\Delta T)$: 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。

$$\left. \begin{aligned} D_c(\Delta T) &= D_c(1 + \alpha_{cd}) \\ L_c(\Delta T) &= L_c(1 + \alpha_{ca}) \\ D_p(\Delta T) &= D_p(1 + \alpha_p) \\ L_p(\Delta T) &= L_p(1 + \alpha_p) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

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、ペレットの熱膨張率であり MATPRO の式より以下のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{cd} &= -2.373 \times 10^{-4} + 6.721 \times 10^{-6} \times T \quad ^\circ\text{C}^{-1} \\ \alpha_{ca} &= -2.506 \times 10^{-5} + 4.441 \times 10^{-6} \times T \quad ^\circ\text{C}^{-1} \\ \alpha_p &= -4.972 \times 10^{-4} + 7.107 \times 10^{-6} \times T \\ &\quad + 2.581 \times 10^{-9} \times T^2 + 1.140 \times 10^{-13} \times T^3 \quad ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned} \right\} (5)$$

(5)式より °C時の熱膨張を求め(4)式に代入すると

$D_c(\Delta T) =$		(14×14 型, 15×15 型)
$L_c(\Delta T) =$		(17×17 型タイプ 57)
$D_p(\Delta T) =$		(14×14 型, 15×15 型)
$L_p(\Delta T) =$		(17×17 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

$V =$		m ³	(14×14 型, 15×15 型)
		m ³	(17×17 型タイプ 57)

以上より求めた V_0 、 V を(1)式に代入すると °Cに昇温後の被覆管内圧はそれぞれ

$P =$		Pa	(14×14 型, 15×15 型)
		Pa	(17×17 型タイプ 57)

となる。

ここで大気圧が1気圧(1.01×10^5 Pa)とすると、被覆管の内外差圧は、

	Pa	(14×14 型, 15×15 型)
	Pa	(17×17 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。

$$\sigma_{\theta} = \frac{PD_c(\Delta T)}{2t}$$

ここで、

σ_{θ} : 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)

$D_c(\Delta T)$: 被覆管内径 9.41×10^{-3} m (14×14 型, 15×15 型)

8.37×10^{-3} m (17×17 型タイプ 57)

t : 被覆管肉厚 6.6×10^{-4} m (14×14 型, 15×15 型)

5.7×10^{-4} m (17×17 型タイプ 57)

これらを代入して

$\sigma_{\theta} =$ MPa (14×14 型, 15×15 型)

$=$ MPa (17×17 型タイプ 57)

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

なお、被覆管の健全性は 500 °C 以上の温度まで保たれる事が実験 (参考文献(3)) により判っている。

B.5.4.2 輸送容器の最大内圧

(1) 外板-内板間の最大内圧

外容器の外板と内板の間の発泡ポリウレタンを充てんした空間は外板に設けられた可融栓によって内圧が上昇する事はない。

(2) 容器内外差圧

輸送容器のガスケットは不連続であり密封構造となっていない。そのため、温度上昇に伴う内圧上昇はない。

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、外容器の板厚は最大で 2.7mm 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しない。耐火試験後の検査でも、耐火試験により容器に割れや臨界評価上問

題となる変形は認められなかった。

B.5.6 結果の要約及びその評価

輸送物の熱解析の結果を表(ロ)B-7にまとめる。一般の試験条件では最低温度 -40°C から最高温度 $\square^{\circ}\text{C}$ について評価し、輸送物に問題ないことを確認した。特別の試験条件では、3種類の下落試験を行った試験体に対して耐火試験を行い、試験結果について評価を行った。

耐火試験では、模擬燃料集合体、クラムシェル、減速材ブロックに大きな損傷は認められなかった。また、減速材ブロックの重量を耐火試験の前後に測定した結果、質量の減少は認められず、健全性が損なわれることはなかった。

輸送容器の材質であるステンレス鋼 (SUS304) の融点は $1,400^{\circ}\text{C}\sim 1,455^{\circ}\text{C}$ であり 800°C において原型が損なわれることはなかった。

収納物である燃料棒の被覆管材料のジルカロイ-4の融点は $1,782^{\circ}\text{C}$ 、ジルコニウム合金の融点は $1,796^{\circ}\text{C}$ であり、評価結果の $\square^{\circ}\text{C}$ 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、耐火試験条件下において燃料棒の密封性は維持される。

なお、(ロ)-A章にて述べたように臨界解析における特別な試験条件下では保守的に燃料棒内へ水が浸入するものとして評価している。

表(ロ)B-7 熱解析結果

条件	項目	解析基準	解析基準値	解析結果	評価
一般の試験条件	1. 最高温度 1) ケース表面	ケース表面温度	—	<input type="text"/> °C	健全
	2. 最低温度 1) 輸送容器	最大使用温度	—	-40 °C	健全
	3. 最大内圧 1) 燃料棒	ケース表面温度に基づく燃料棒内外差圧	—	<input type="text"/> Pa	—
特別の試験条件	1. 最高温度 1) 被覆管	被覆管温度	500 °C	<input type="text"/> °C	燃料棒の 密封性は 維持
	2. 最大内圧 1) 燃料棒	被覆管周方向応力	<input type="text"/> MPa	<input type="text"/> MPa	

参考文献

- (1) Application for Certificate of Compliance for the Traveller PWR Fuel Shipping Package, NRC Certificate of Compliance, USA/9297/AF-96, Docket 71-9297, Safety Analysis Report, Revision14
- (2) (社) 日本原子力学会標準 「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物 輸送容器の安全設計及び検査基準」
- (3) 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

付属資料

- 1) (ロ)B 付属資料 1 フルスケールモデル耐火試験結果

(ロ)B 付属資料 1

フルスケールモデル耐火試験結果

(ロ)B 付 1-1

1.概要

2004年2月5日にオハイオ州コロンビアナ郡にて Traveller XL 型輸送容器の認証試験ユニット(CTU)の落下試験を実施した。その後、CTUを、2月6日にサウスカロライナ州コロンビアの South Carolina Fire Academy に輸送し、2月10日に、CTUを燃焼プール内に設置して耐火試験を実施した。

試験の結果、外容器の損傷は小さく、少量のポリウレタン分解物が外容器の内部へ流入したものの、模擬燃料集合体、クラムシェル、及び減速材ブロックは殆ど損傷しないことを確認した。また、減速材である超高分子■ポリエチレンが水素を失わないことを確認した。

2.試験体系

2.1 Traveller XL CTU

耐火試験前のCTUに対して、表(ロ)A-11に示すように3種類の落下試験を実施した。試験①の自由落下(1.2m落下)では、衝突面や上側ケースの補強リングが局所的に変形したものの、変形は小さかった。試験②の落下試験Ⅰ(9m落下、垂直落下)では、輸送容器に局所的な変形が生じたが、変形量は12.7mmと小さかった。試験③の落下試験Ⅱ(1mターゲット落下)では局所的な凹みが生じたが、貫通孔は発生しなかった。耐火試験完了後に輸送容器を開封し内部確認したところ、内部構造部品は軽微なものを除き、大きな損傷は生じなかった。以上の事から、落下試験により、耐火試験での温度上昇につながるような変形、損傷は生じなかったものと考えられる。

CTU内には、(ロ)A.9.2で述べたように、模擬燃料集合体を収納している。CTU内部の温度は本付属の2.3項にて後述するように、粘着式サーモラベルで測定した。

2.2 燃焼プール

図(ロ)B付1-1に、耐火試験の配置図を示す。CTUはスチール製のスタンドの上、燃焼プール面から約1mの位置に配置した(図(ロ)B付1-2参照)。プールはスチール製ディフューザーで囲われていた(図(ロ)B付1-3参照)。ディフューザーの壁面高さはプール表面から約1.6mであり、CTU頂上部の高さとほぼ同等であった。また、CTUからディフューザーの壁までの距離は、端面から1.7m、側面から1.8mであった。燃焼プールは水冷式の堰(せき)で区切られ、燃料をプール全体に均等に供給した。

燃焼プールは、燃料遮断弁と消火発砲材により消火する。燃料遮断弁を締めてプールへの燃料供給を止め、消火発砲材をプール内に注入することで、プール火災は60秒以内に鎮火することができる。なお、本消火装置使用時に、CTU自体は冷却されない。

2.3 測定装置

耐火試験で用いた測定装置は以下の通りである。

- ビデオカメラ(4台)
- デジタルカメラ
- Omega社の10フィート長のリード線付きK熱電対
(接続用ネジ端子付きはXCIB-K-4-2-10。エアフード付きはXCIB-K-3-2-10)
- Omega社OM-CP-OCTTEMPデータロガー(2台)
- Omega社USBレコーダーデータ収集処理モジュール及び防水型電子ボックス

- 指向性火炎温度計 (DFT) (4 台)
- ノートパソコン
- 携帯型放射温度計
- 粘着式サーモラベル (TL-E-170、TL-E-250、TL-E-330)
- Edmund Scientific 社のプロペラ式風速計

試験中は熱電対、指向性火炎温度計 (DFT) 及び放射温度計により各所の温度を測定した。

熱電対は、輸送容器表面から 0.9m の位置に 12 箇所、輸送容器表面に 6 箇所取り付け、DFT は輸送容器表面に 4 箇所取り付け、その外側の温度を測定した。熱電対及び DFT の配置図を図(ロ)B 付 1-4に示す。

耐火試験中、熱電対及び DFT の一部はノートパソコンに接続し、リアルタイムで温度を監視した。リアルタイムで監視した測定箇所は以下の通りである。

- ・ 北東の下部の火炎温度
- ・ 南東の下部の火炎温度
- ・ 北西の下部の火炎温度
- ・ 南西の下部の火炎温度
- ・ 北東の DFT
- ・ 南東の DFT
- ・ 北西の DFT
- ・ 南西の DFT

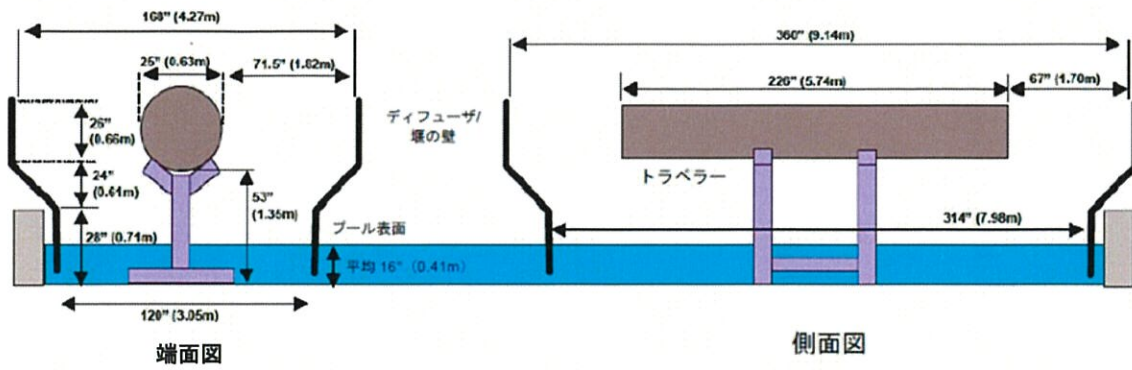
その他計 14 チャンネルのデータ記録のため、2 台のデータロガーを使用した。1 台は東側の温度を記録し、もう 1 台は西側の温度を記録した。

火炎の外からも 2 台の携帯型放射温度計を使用して温度データを収集した。1 台は CTU の西側、2 台目は CTU の東側に配置し、それぞれの温度データは手動で記録した。

温度の測定誤差は、熱電対、DFT 及びデータロガー、ノートパソコンの誤差を足し合わせても、6.8°C 程度である。CTU 耐火試験における 30 分平均温度は 834°C であり、誤差を考慮しても平均温度が 800°C 以上であったといえる。

CTU 内部の温度は、粘着式サーモラベルを用いて測定した。貼り付け位置は衝撃吸収体の内面、外容器上側ケースの減速材を覆うステンレスシート、クラムシエルの内面である。粘着式サーモラベルの位置を図(ロ)B 付 1-5に示す。

風速は燃焼試験前から燃焼試験後にかけて、5 分間隔で測定した。



図(ロ)B 付 1-1 耐火試験のための CTU 配置

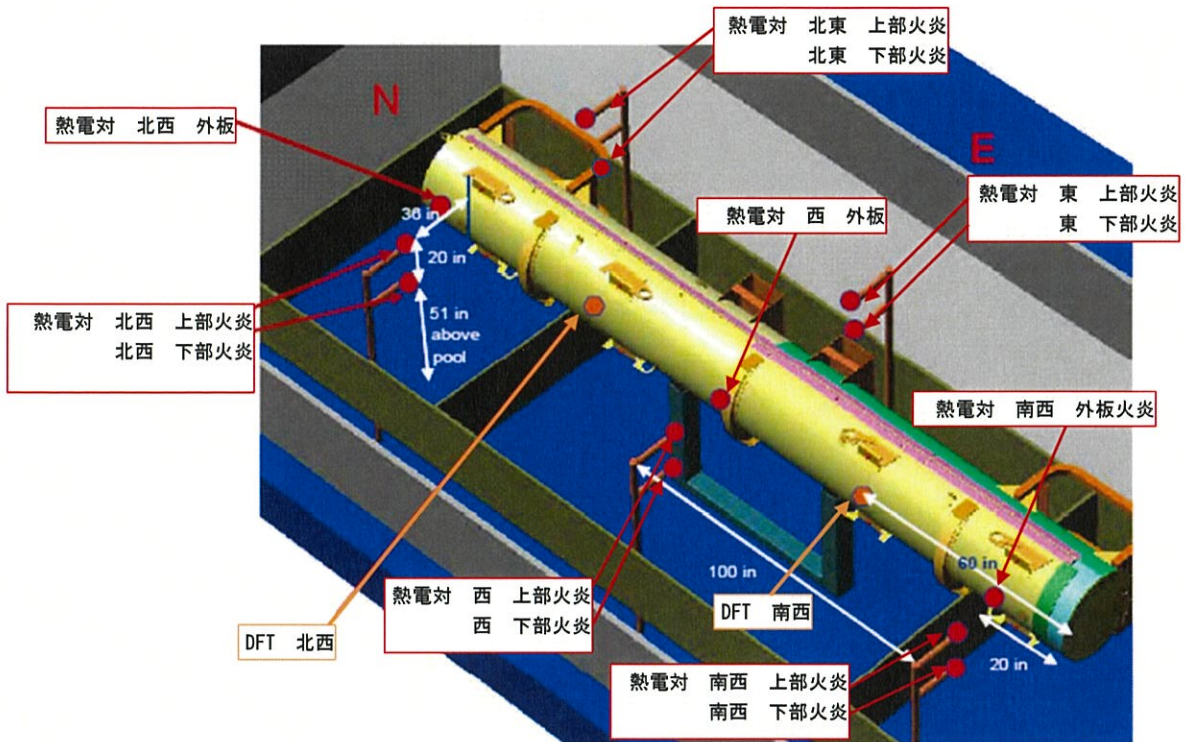


図(ロ)B 付 1-2 耐火試験用スタンド



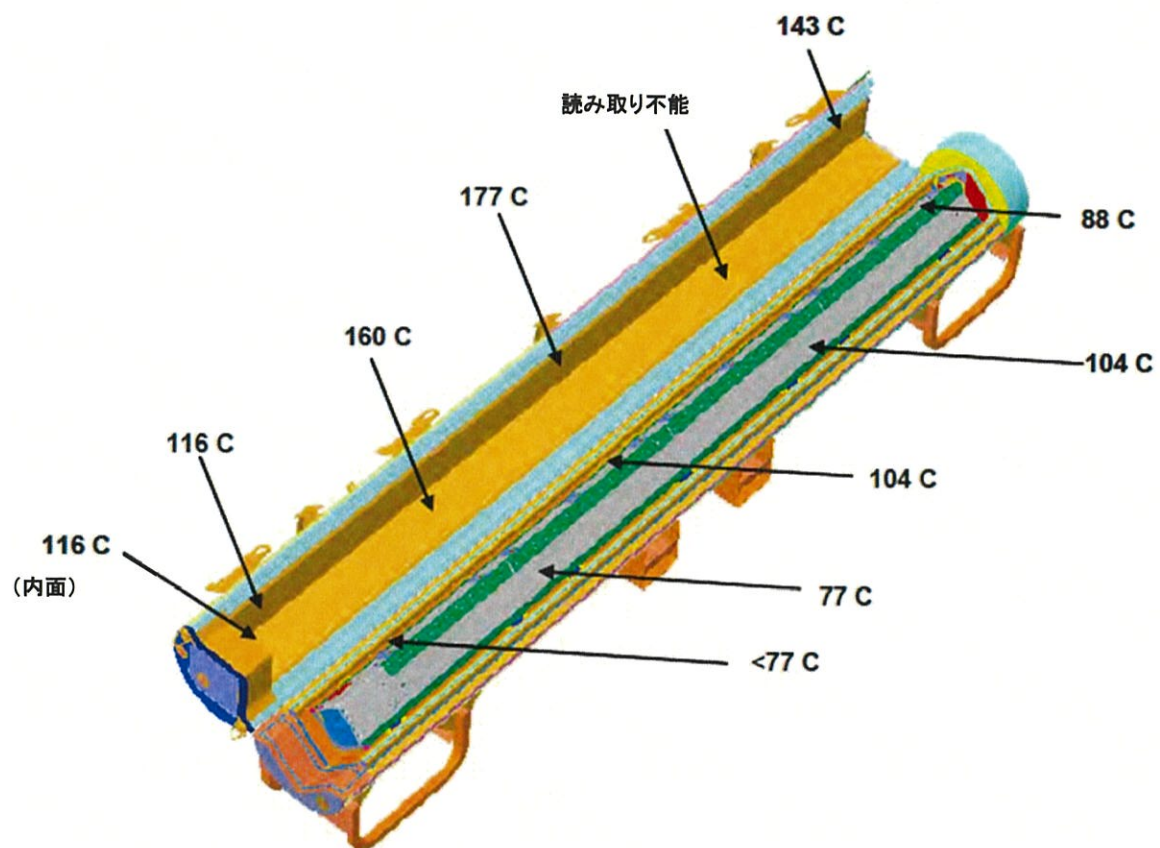
図(ロ)B 付 1-3 試験設備とスチール製ディフューザー

(ロ)B 付 1-6



※作図の都合上、熱電対の「南東 上部火炎」、「南東 下部火炎」、「北東 外板」、「東 外板」、「南東 外板」、DFTの「DFT 北東」、「DFT 南東」は省略している。

図(ロ)B付 1-4 CTU 耐火試験時の温度測定位置



図(ロ)B 付 1-5 粘着式サーモラベルの貼り付け位置と表示温度

3. 試験手順及び結果

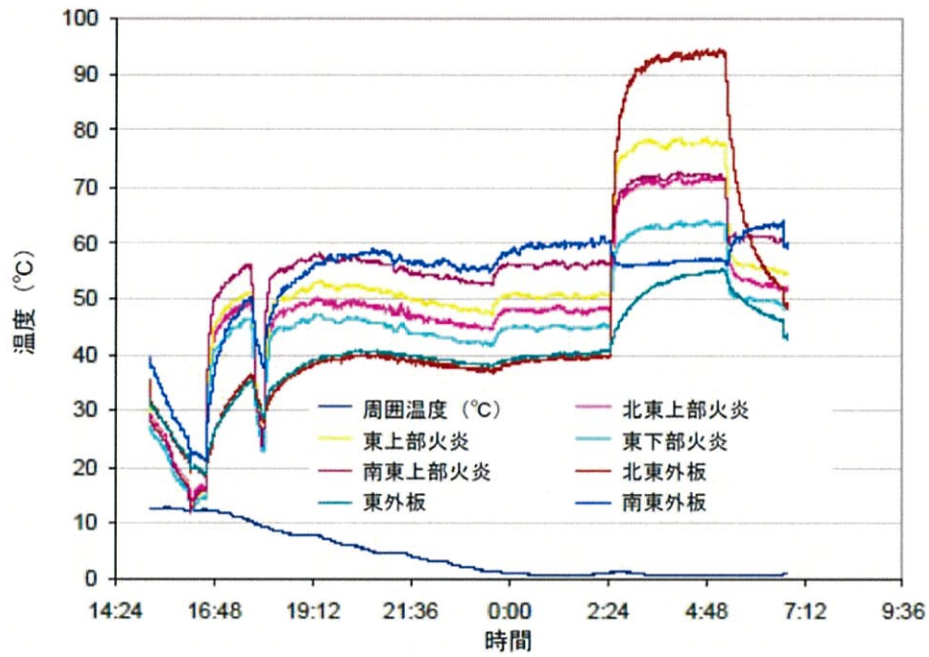
耐火試験は2004年2月10日に実施された。夜間の温度が氷点下近くまで低下したため、CTUをシートで覆い(図(ロ)B付1-6参照)、テント内を灯油ヒーターで加熱しテント内温度を40~80°Cに維持した。なお、局所的な最高温度は115°Cに達した。

ヒーターを午前7時15分過ぎに停止し、シートを午前7時20分~8時の間に取り外した。輸送容器周辺の温度測定結果を(図(ロ)B付1-7及び(ロ)B付1-8)に示す。

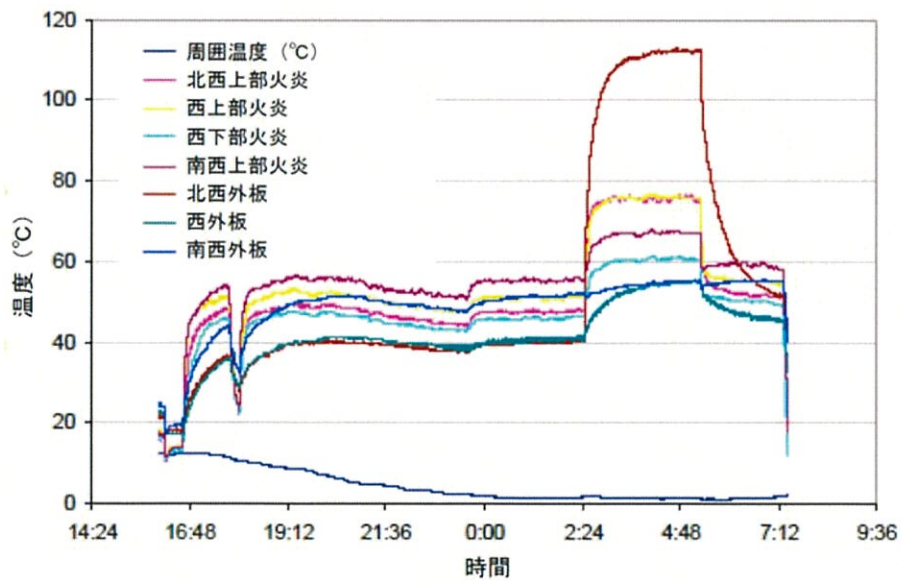
耐火試験は午前8時32分~9時6分を実施した。耐火試験の様子を(図(ロ)B付1-9)に示す。午前8時26分から燃料供給を開始し、150ガロン分の燃料をプールに供給した。午前8時32分にプールに点火し、1分後にはプール全体が火炎に包み込まれた。その後、燃料の供給流量は16~22ガロン/分の間で調整し、火炎を維持した。燃料の投入は午前9時4分に終了し、消火装置を1分後に起動した。鎮火直後に、プールの一端の残留燃料が再発火したが、消火装置を再び使用し直ちに鎮火された。



図(ロ)B 付 1- 6 夜間温度維持のためのテント



図(ロ)B付 1-7 CTU 東側の夜間温度



図(ロ)B付 1-8 CTU 西側の夜間温度



図(ロ)B 付 1-9 CTU 耐火試験の様子

耐火試験中の熱電対及び DFT による温度測定データを図(ロ)B 付 1- 10～図(ロ)B 付 1- 15 に、火炎の外の携帯型放射温度計による温度測定データを表(ロ)B 付 1- 1 及び表(ロ)B 付 1- 2 に示す。

30 分平均温度について各測定箇所の平均をとると、熱電対では輸送容器の外板で 904℃、火炎内で 859℃、DFT では 833℃、放射温度計では 958℃であった。

風速は、燃焼試験前から燃焼試験後にかけて測定を実施した。測定データを表(ロ)B 付 1- 3 に示す。試験中の平均風速は 1.4 km/h であった。試験中に測定したピーク風速は 3.5 km/h であった。

耐火試験が実施された試験場は屋外にあるため、風の影響により炎の形状に乱れが生じた。その結果、図(ロ)B 付 1- 10～図(ロ)B 付 1- 15 に示すように、試験中に温度変動が生じた。特にプールの四隅では、火炎から外れることが多かったため温度変動が大きくなった。

表(ロ)B 付 1- 4 に、試験の熱電対データを纏める。すべての測定箇所において最高温度が 900℃を超えていた。プールの四隅はプールの中央部と比較して 30 分平均温度は低くなった。プール四隅の熱電対(計 8 つ)の 30 分平均温度の平均が 812℃であったのに対し、火炎中の全熱電対(計 12 つ)の 30 分平均温度の平均は 862℃であった。

表(ロ)B付 1-1 放射温度計測定データ (西側)

(単位:°C)

着火後の経過時間	温度(北端)	温度(中央)	温度(南端)
0分	922	944	874
5分	1,047	973	1,025
10分	1,002	1,092	993
15分	937	847	987
20分	1,177	982	942
25分	1,062	1,073	1,058
30分	898	1,162	968
35分	525	460	484
40分	318	362	294

表(ロ)B付 1-2 放射温度計測定データ (東側)

(単位:°C)

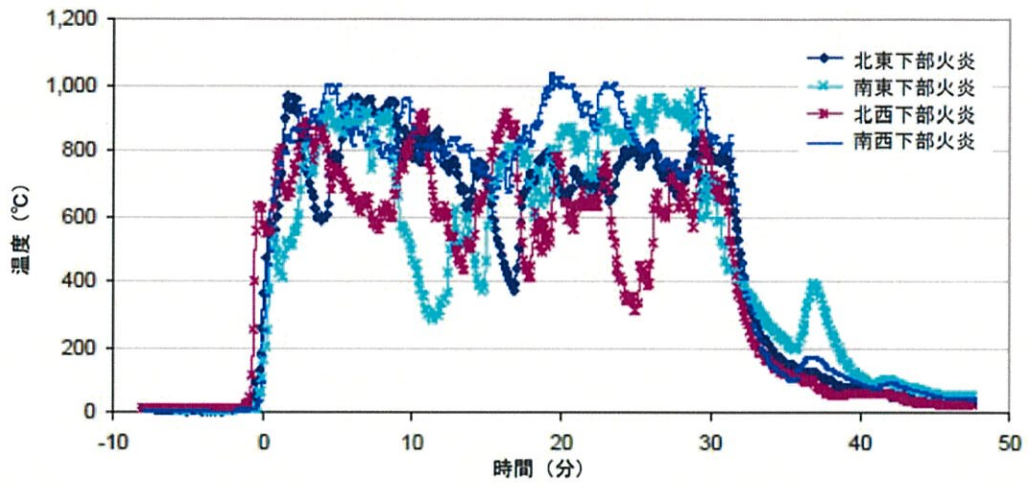
着火後の経過時間	温度(北端)	温度(中央)	温度(南端)
0分	800	1,000	936
5分	978	1,062	837
10分	1,037	948	932
15分	842	996	835
20分	590	1,120	978
25分	552	969	1,048
30分	1,098	740	980
35分	No Data	No Data	No Data
40分	No Data	No Data	No Data

表(ロ)B付1-3 風速データ

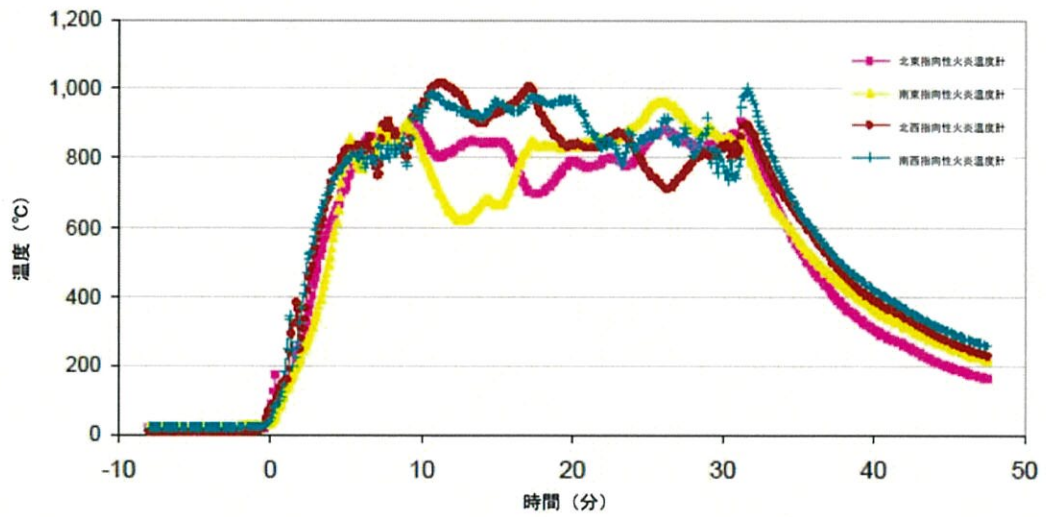
時刻	風速 (km/h)	風向き
8:05	2.7	東
8:10	3.2	北東
8:15	2.7	東
8:20	3.2	東
8:25	1.3	東
8:30	1.3	東
8:35	1.3	東
8:40	1.0	東
8:45	2.1	東
8:50	3.5	北
8:55	0	—
9:00	2.4	北
9:05	0	—
9:10	2.1	西
9:20	2.7	南西
9:30	2.1	南西

表(ロ)B 付 1-4 耐火試験時の温度まとめ

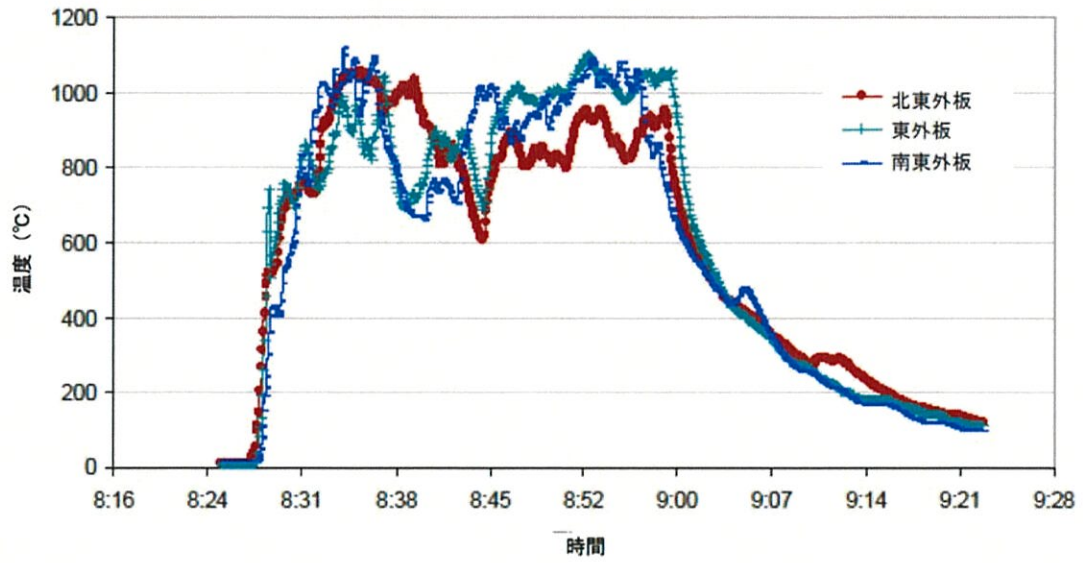
熱電対、DFT 位置	30 分平均温度(°C)	最高温度 (°C)	最低温度 (°C)
北東下部火炎	727	959	275
北東上部火炎	925	1,245	493
東下部火炎	926	1,155	489
東上部火炎	904	1,163	532
南東下部火炎	714	962	291
南東上部火炎	924	1,245	484
北西下部火炎	630	906	329
北西上部火炎	748	1,059	458
西下部火炎	997	1,162	640
西上部火炎	1,027	1,173	661
南西下部火炎	827	1,032	230
南西上部火炎	1,000	1,213	598
北東 DFT	804	907	454
南東 DFT	801	964	338
北西 DFT	854	1,016	541
南西 DFT	876	1,003	594
北東外板	878	1,058	610
東外板	917	1,073	699
南東外板	903	1,088	542
北西外板	725	990	492
西外板	974	1,080	682
南西外板	1,028	1,143	719



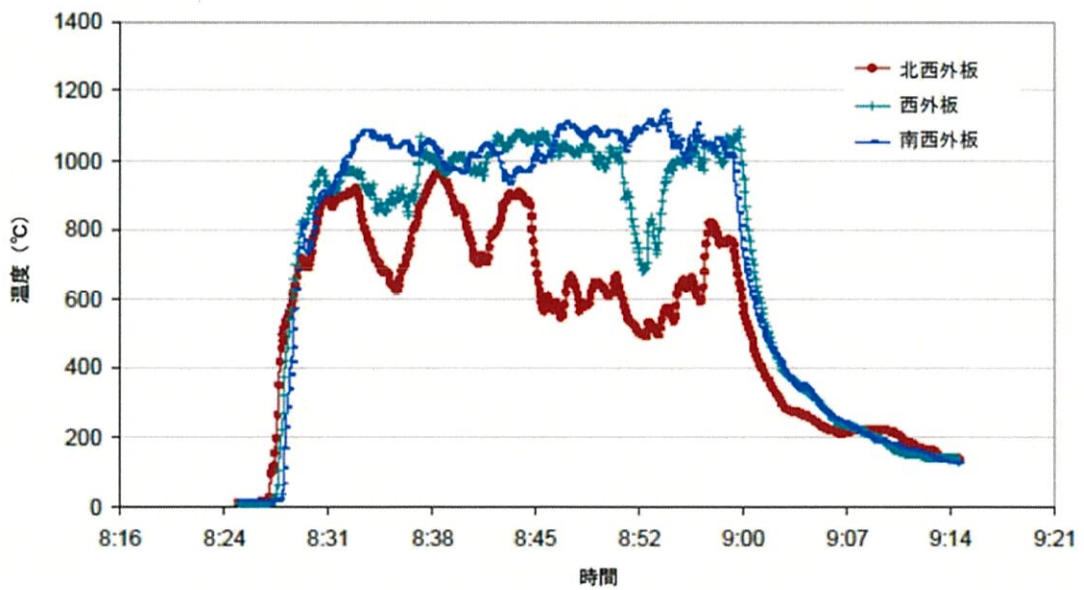
図(ロ)B 付 1- 10 熱電対による火炎温度データ (リアルタイム監視)



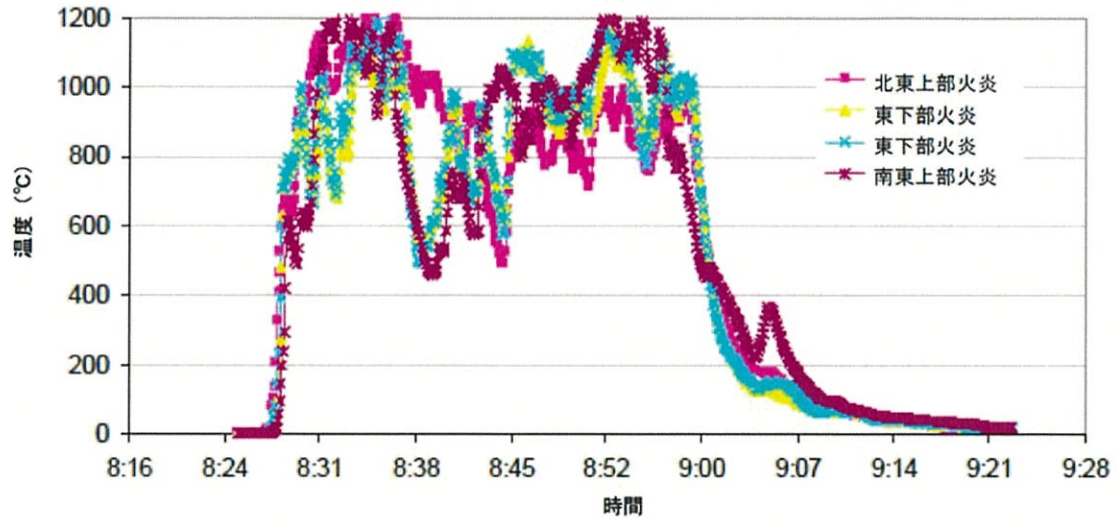
図(ロ)B 付 1- 11 指向性火炎温度計 (DFT) による火炎温度データ (リアルタイム監視)



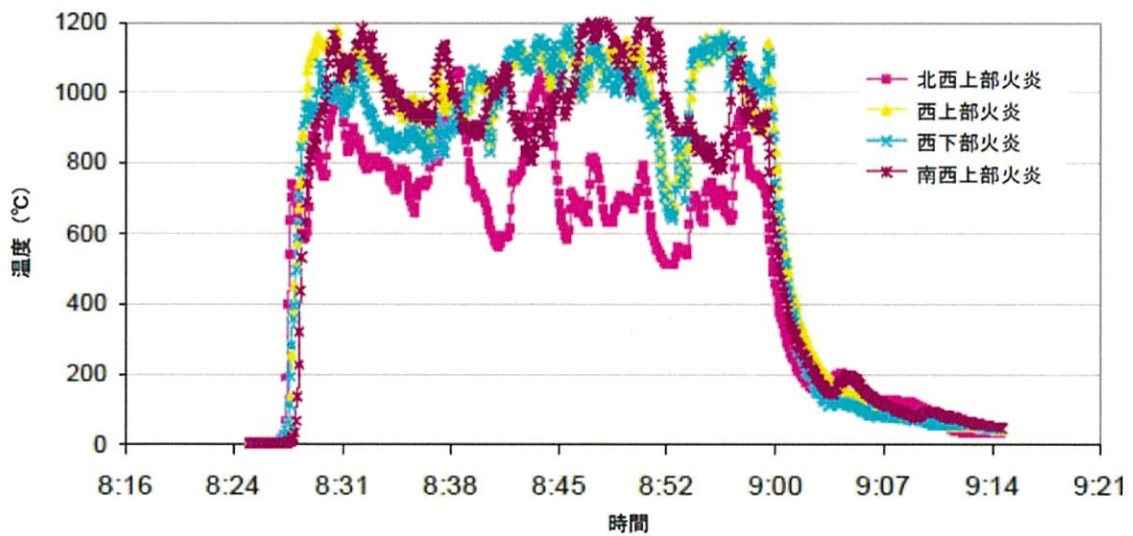
図(ロ)B 付 1- 12 外板温度データ (東側)



図(ロ)B 付 1- 13 外板温度データ (西側)



図(ロ)B 付 1- 14 火炎温度データ (東側)



図(ロ)B 付 1- 15 火炎温度データ (西側)

耐火焼試験後に輸送容器の内外部を調査した。図(ロ)B付 1-16 に示すように、外容器のフランジ部にポリウレタンの炭化物を確認した。可融栓から流れ出したポリウレタンが堆積したものと考えられる。また、図(ロ)B付 1-17 に示すように、輸送容器内にポリウレタンの燃えカス(茶色いタール)を確認した。フランジ部に生じたわずかな隙間から少量のポリウレタンが侵入したと考えられる。いずれも輸送容器の健全性に影響するものではなかった。

超高分子量ポリエチレン製の減速材ブロックを調べたところ、局所的なものを除き、大きな損傷はなかった。図(ロ)B付 1-18 に示すように、輸送容器の下部ノズル側において、減速材ブロックのごく一部に変色が認められた。こちらは、局所的であることと、減速材ブロックを覆っている断熱材に変質が認められないことから、容器製作時のステンレス鋼製カバーシートの溶接時に生じたと考えられる。

図(ロ)B付 1-19 に示すように、外容器の上側ケース側に取り付けた減速材ブロックの裏側に、茶色い焦げ痕が認められた。この位置の減速材ブロックは、局所的に融点まで達したと考えられるが、融解した体積は小さく、わずか数 cm³であった。また、融点に達した場合でも、減速材ブロックの粘度が非常に高く液化しないため、殆ど変形しなかった。

12 枚の減速材ブロックに対する試験前後の重量変化を表(ロ)B付 1-5 に示す。すべてのブロックについて有意な重量の減少は認められず、十分な水素含有量を保っていたことが確認された。

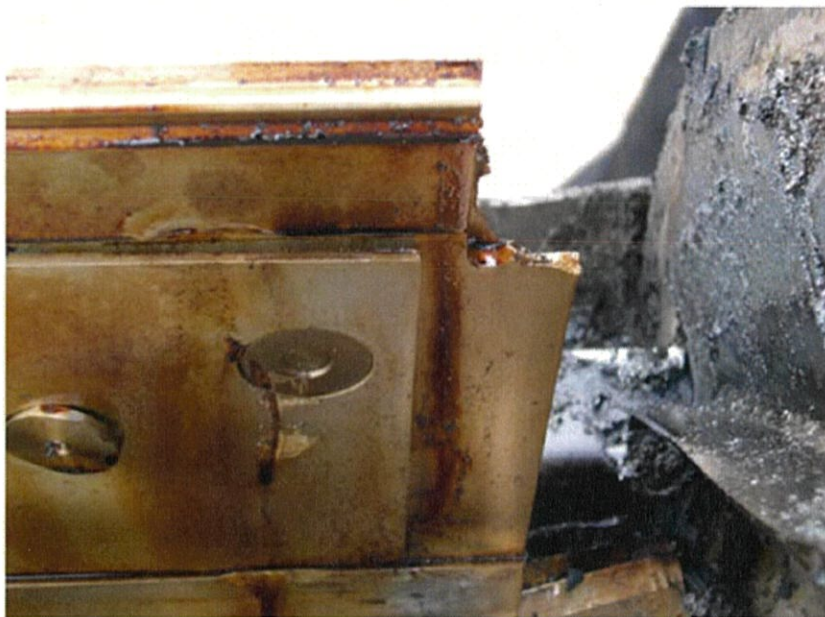
ショックマウントを外観検査した結果、すべて損傷は認められなかった。

表(ロ)B 付 1-5 減速材ブロック重量

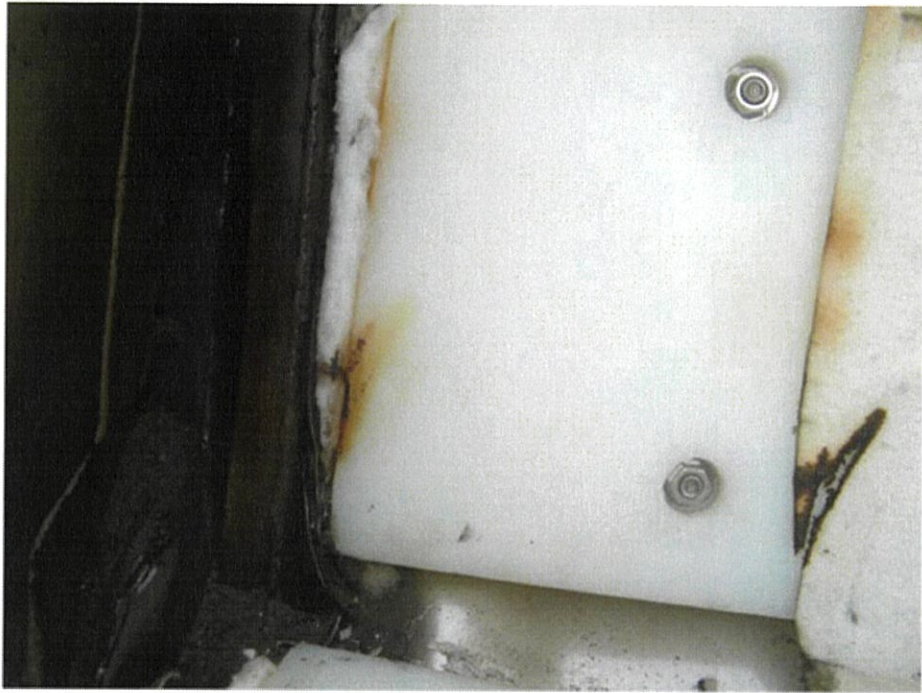
位置	試験前重量(kg)	試験後重量(kg)
下側ケース 上端左	21.4	21.4
下側ケース 上端右	21.4	21.4
下側ケース 下端左	20.2	20.3
下側ケース 下端右	21.0	21.0
上側ケース 上端左	18.3	18.5
上側ケース 上端右	18.3	18.2
上側ケース 下端左	18.3	18.4
上側ケース 下端右	18.3	18.3
合計	157.2	157.5



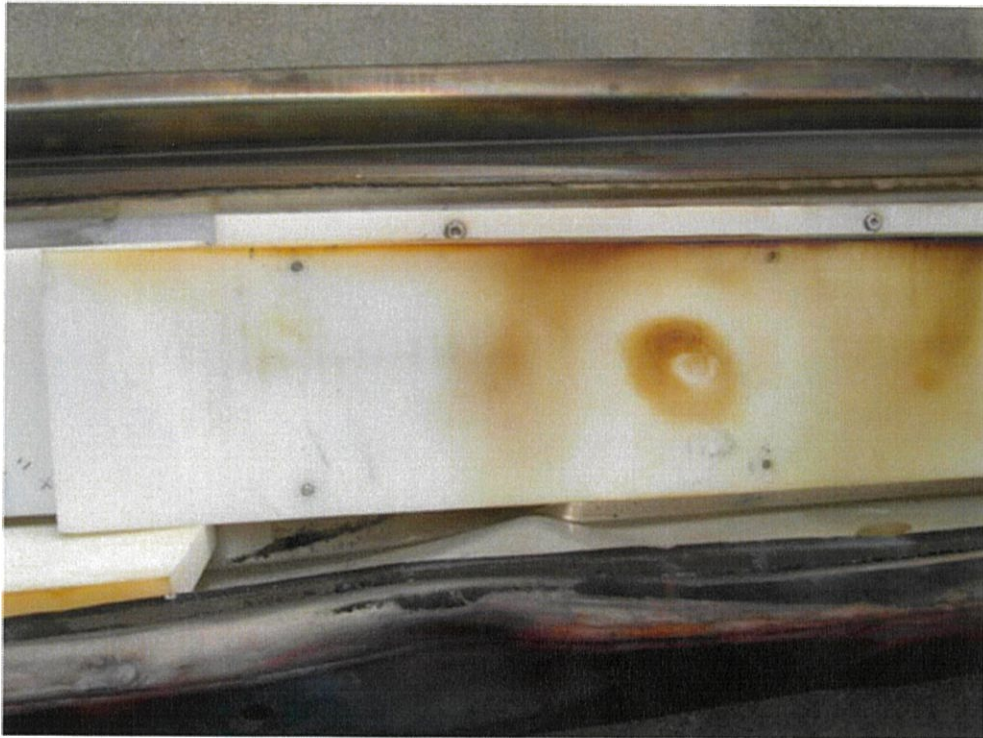
図(ロ)B 付 1- 16 外容器フランジ部のポリウレタン炭化物



図(ロ)B 付 1- 17 外容器内部で焦げたポリウレタン



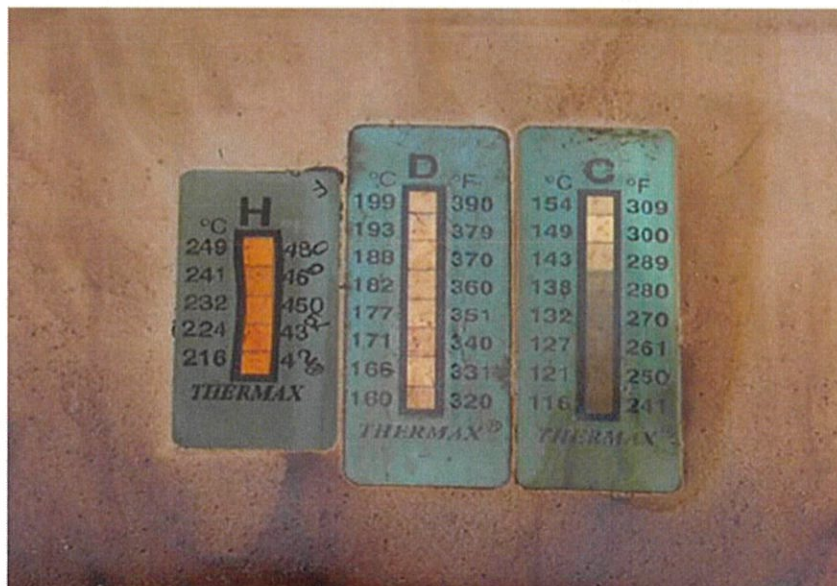
図(ロ)B 付 1- 18 下部ノズル側の減速材ブロックに確認された変色



図(ロ)B 付 1- 19 減速材ブロックの局所的な溶融箇所

粘着式サーモラベルの温度測定結果を図(ロ)B 付 1・5 に示す。また、粘着式サーモラベルの測定例を図(ロ)B 付 1・20 に示す。クラムシェル内の温度は最大 104°C、外容器内部の温度は最大 177°C であった。なお、外容器内部のサーモラベルが 1 箇所読み取れなかったが、熱及びウレタン炭化物による変色が原因である。なお、その周辺の模擬燃料集合体と減速材ブロックを調査したが、熱による大きな損傷は認められなかった。

外板及び輸送容器内部ともに、輸送容器の軸方向に温度分布が生じた。外板の北(北東、北西)、中央(東、西)、南(南東、南西)の 30 分平均温度の平均はそれぞれ、801°C、946°C、915°C であった。粘着式サーモラベルによって記録されたピーク内部温度は、輸送容器の北で 116°C、中央で 177°C、南側の端で 143°C であったことから、外板の温度と内部温度に相関関係があることがわかる。



図(ロ)B 付 1・20 粘着式サーモラベルの測定例

4. まとめ

落下試験後の認証試験ユニット(CTU)を用いて 800℃×30分耐火試験を実施した。試験の結果、輸送容器の材質であるステンレス鋼(SUS304)の融点は 1,400℃～1,455℃であり 800℃において形状が損なわれなかった。また、模擬燃料集合体、クラムシェル、減速材ブロックに大きな損傷は認められなかった。さらに減速材ブロックの重量を耐火試験の前後に測定した結果、質量の減少は認められず、健全性が損なわれることはなかった。

実施した試験は、告示に要求される周囲温度や太陽放射等の要件と一部相違するため、温度測定結果を熱解析により補正し、その結果を評価に適用することとする。

(ロ)-C 密封解析

C.1 概 要

本輸送容器は、外容器及びクラムシェルと呼ばれる保護容器から構成される。外容器は、ステンレス鋼製の二重壁構造であり、落下時の衝撃及び火災時の熱の流入を緩和するため二重壁内に発泡ポリウレタンが充填されている。また、外容器の両端部には、落下時の衝撃を吸収するための衝撃吸収体及び枕型構造体が備わっている。外容器の上側ケースと下側ケースは、左右両側がヒンジ及びボルトによって固定される構造である。

クラムシェルは、アルミニウム合金製板からなる箱型構造となっており、収納物の通常の取り扱い時の損傷を防止するとともに、輸送事故時の際の収納物の変形を制限する。クラムシェルの扉は、ヒンジ及びラッチによって固定される構造である。また、中性子吸収材である BORAL® 製板は、クラムシェル内側の全面に配置している。

本輸送容器に収納する核燃料物質は、最大 kgUO₂ の焼結研磨された未照射の二酸化ウラン焼結体（ペレット）又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結体（ペレット）である。この核燃料物質の最大濃縮度は、% であり、収納される状態としては、二酸化ウランペレット又はガドリニア入り二酸化ウランペレットをジルカロイ-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である。

(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。

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最大 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、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。

なお、本輸送容器は、周囲環境から密封されているわけではないため、輸送容器内外で差圧が生じることはない。

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盲栓型式の端栓を用いて溶接密封する型式をとっており、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溶接密封しており、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ペレット又はガドリニア入り二酸化ウランペレットであるため、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 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。

C.5 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下における輸送物の密封性について評価した。この結果、一般の試験条件下について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。

(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 \square wt%以下の濃縮ウランを使用した PWR 用未照射燃料集合体であり、その線源強度が低いため特別の遮蔽装置は設けていない。

輸送物からの線量当量のほとんどは、ウラン及びその娘核種がアルファ崩壊又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。

遮蔽評価にあたって、線源強度は ORIGEN2.2 ((ロ)D 参考資料 1) を用いて、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 QAD-CGGP2R ((ロ)D 参考資料 2) を用いて評価した。

なお、評価の際、以下の安全側なモデル化を行った。

- ① 通常輸送時の解析モデルは、筒状の外容器外板に直方体形状の燃料集合体が収納されるようモデル化し、遮蔽体として外容器外板のステンレス鋼のみを考慮した。この際、径方向については、外容器外板の実寸法を用いてモデル化した。軸方向については、燃料有効長上下端から外容器外板までの領域のうち、燃料集合体の各種部材（上下部の端栓、プレナム、ノズル）及びクラムシェルを無視し、実寸法は約 300mm 以上であるところを \square mm とモデル化した。
- ② 一般の試験条件下の解析モデルは、通常輸送時と同じく、筒状の外容器外板に直方体形状の燃料集合体が収納されるようモデル化し、遮蔽体として外容器外板のステンレス鋼のみを考慮した。この際、径方向については、通常輸送時の解析モデルから外容器外板の外径を \square mm 縮めるようモデル化した。軸方向については、通常輸送時の解析モデルにおいて十分安全側なモデルを採用しているため、通常輸送時の解析モデルと同一とした。
- ③ 線源領域は、燃料集合体 1 体を燃料集合体の外寸法と燃料有効長からなる直方体としてモデル化した。この際、ウラン量が最大となるようモデル化した。
- ④ 遮蔽評価は、14×14 型、15×15 型、17×17 型タイプ 64 及び 17×17 型タイプ 57 の 4 ケースについて比較し、ウラン量が最大であり最も線量当量率が高くなる 17×17 型タイプ 57 を線源と設定して行い、通常輸送時及び一般の試験条件下での線量当量率の最大値を評価した。

以上の評価条件に基づき得られた評価結果を表(ロ)D-1に示す。

通常輸送時における輸送物表面の最大線量当量率は mSv/h 以下、表面より 1 m の点の最大線量当量率は μSv/h 以下であり、A 型輸送物に係る技術上の基準である線量当量率（表面で 2 mSv/h 以下、表面より 1 m の点で 100 μSv/h 以下）を満足する。

また、一般の試験条件下における輸送物表面の最大線量当量率は mSv/h 以下であり、基準の線量当量率（表面で 2 mSv/h 以下）を満足しているとともに、最大線量当量率の増加割合は % であり、著しく増加しない。

表(ロ)D-1 輸送物の最大線量当量率

	輸送物表面		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"/> mSv/h	<input type="text"/> mSv/h	<input type="text"/> μSv/h	<input type="text"/> μSv/h
基準	≤ 2 mSv/h		≤ 100 μSv/h	
一般の試験条件下	<input type="text"/> mSv/h	<input type="text"/> mSv/h	—————	—————
基準	≤ 2 mSv/h		—————	

D.2 線源仕様

本輸送容器の収納物の収納量として、ウラン量が最大となるように、二酸化ウランの密度を100%T.D. (実態は約95～約97%T.D.)、ディッシュ・チャンファを無視するとした。各収納物の収納量を表(ロ)D-2に示す。

表(ロ)D-2 遮蔽評価に用いる各収納物の収納量 (集合体1体あたり)

収納物	収納量(kg-UO ₂)
14×14 型	
15×15 型	
17×17 型タイプ 64	
17×17 型タイプ 57	

D.2.1 ガンマ線源

本輸送容器の収納物は濃縮度が□wt%以下の濃縮ウランで、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

本輸送容器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 C996-96 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、²³⁶U < 125 μg/gU の場合は、²³²U 及び ⁹⁹Tc は適用外である。

ウラン同位体の組成として、線源強度が最も大きくなるように、濃縮度を□wt%とした。

各同位体の組成を表(ロ)D-3に示す。

表(ロ)D-3 ガンマ線源の計算に用いるウラン同位体組成

核種	組成(wt%)
²³² U	[Redacted]
²³⁴ U	
²³⁵ U	
²³⁶ U	
⁹⁹ Tc	
²³⁸ U	

(2) 線源強度

(1)に記したウランの同位体について、ORIGEN 2.2 ((ロ)D 参考資料 1) 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。使用したライブラリを表(ロ)D-4に示す。また、娘核種から放出されるガンマ線の影響を考慮するための崩壊計算の期間は、ガンマ線源スペクトルが飽和するように10年とした。表(ロ)D-5にガンマ線源スペクトルの計算結果を示す。

同様に、各同位体の放射エネルギーを計算した。表(ロ)D-6に放射エネルギーの計算結果を示す。

表(ロ)D-4 ガンマ線源スペクトル計算、放射エネルギー計算に用いた ORIGEN2.2 ライブラリ

ライブラリの種類	ライブラリ名	説明
核反応断面積 核分裂収率	²³⁵ U-enriched UO ₂ ; 50,000MWd/mt	PWR 用高燃焼度ウラン燃料を対象とした ライブラリ
光子収率データ	GXUO2BRM.LIB	二酸化ウラン媒質中における制動放射を 考慮したライブラリ

表(ロ)D-5 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)
0.01	
0.025	
0.0375	
0.0575	
0.085	
0.125	
0.225	
0.375	
0.575	
0.85	
1.25	
1.75	
2.25	
2.75	
3.5	
5	
7	
9.5	

表(ロ)D-6 各同位体の放射エネルギー計算結果 (□ 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)							

D.2.2 中性子源

該当せず。

D.3 モデル仕様

D.3.1 解析モデル

D.3.1.1 通常輸送時

通常輸送時の解析モデルを図(ロ)D-1に示す。補足説明を表(ロ)D-7に示す。

表(ロ)D-7 通常輸送時の解析モデルの補足説明

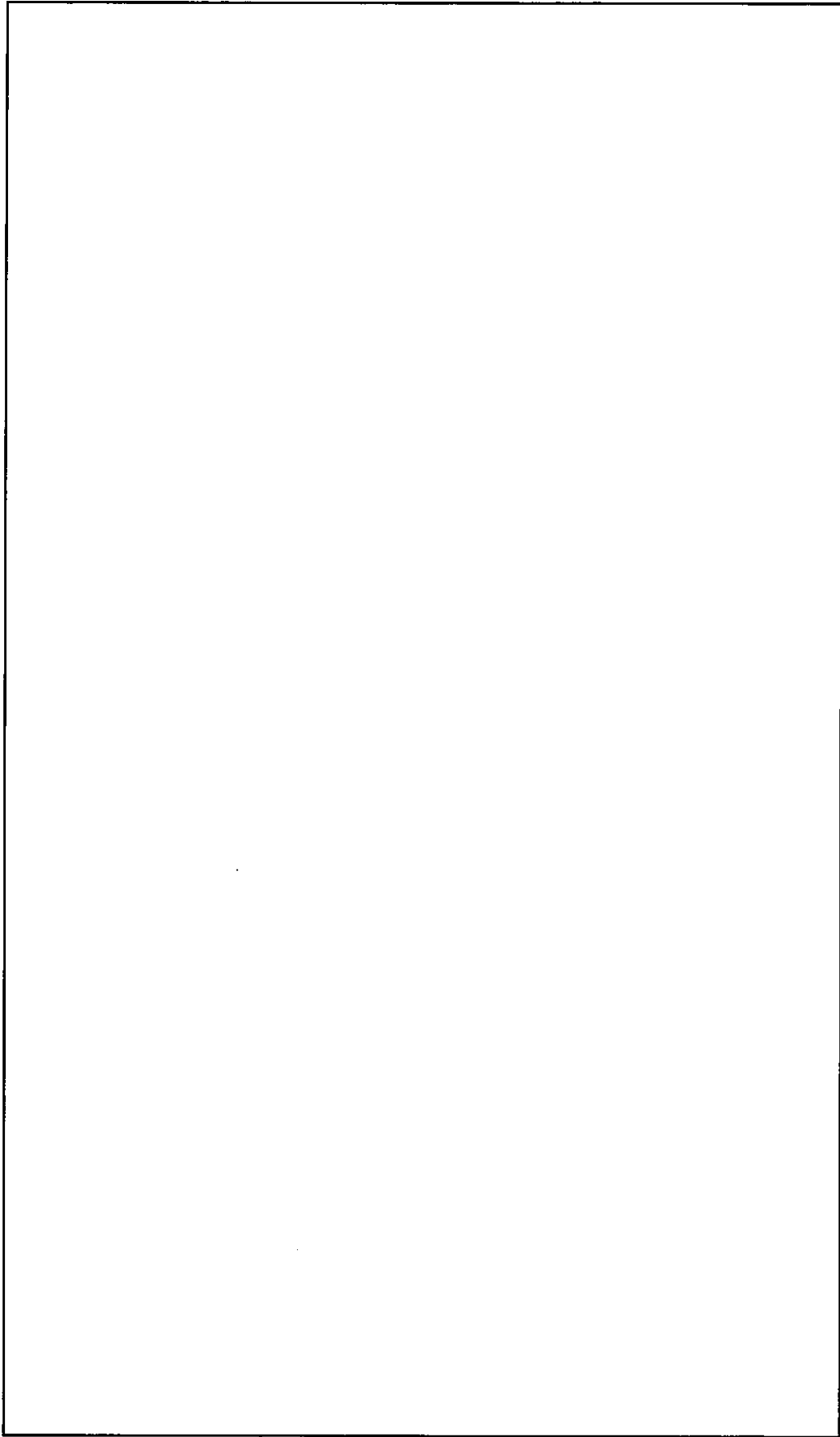
項目		モデル化内容	補足
輸送 容器	形状	円筒形状とする	本輸送容器では、円筒形状の外容器外板を外部との境界としているため。 なお、本輸送容器に開口部はなく、ストリーミング効果は発生しない。
	材質	外容器外板のステンレス鋼のみを考慮する	考慮する遮蔽体を少なくするため。
線源 領域	形状	燃料集合体の外寸法と燃料有効長からなる直方体形状とする	線源領域を均質化することにより、以下の効果が見込めるため。 1) 線源領域の密度が小さくなり線源自身による遮蔽効果が小さくなる。 2) 線源と評価点の距離が近くなる。
	材質	二酸化ウランのみとする	被覆管を考慮しないことにより、線源領域の密度を小さくし線源自身による遮蔽効果を小さくするため。

D.3.1.2 一般の試験条件下

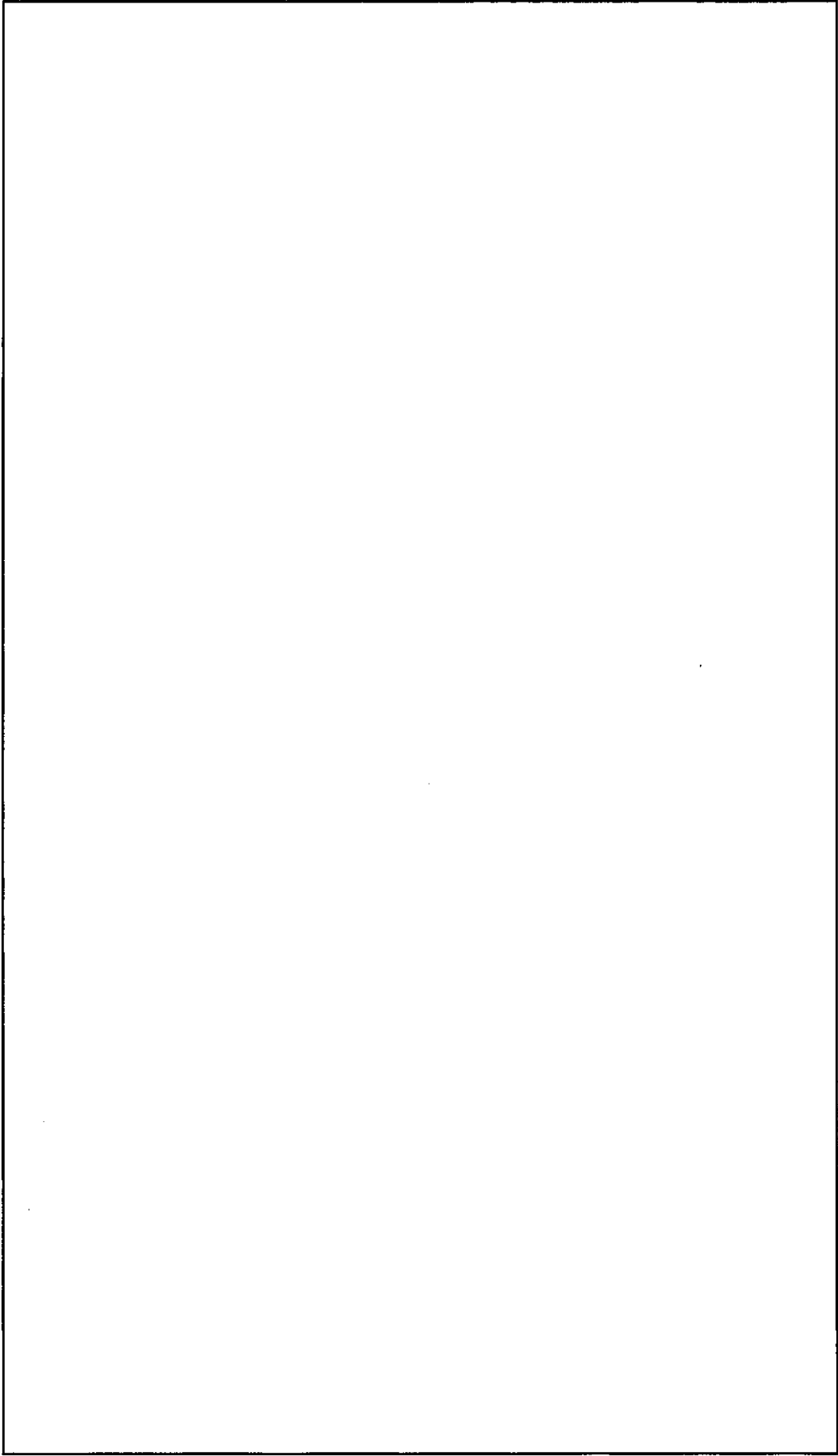
一般の試験条件下の解析モデルを図(ロ)D-2に示す。補足説明を表(ロ)D-8に示す。

表(ロ)D-8 一般の試験条件下の解析モデルの補足説明

項目		モデル化内容	補足
外容器 外板	軸方向	通常輸送時から変更しない	通常輸送時の解析モデルが十分に安全側の設定となっているため。
	径方向	外容器外板の外径を <input type="text"/> mm (外半径に対して <input type="text"/> mm) 縮めるようモデル化する	「(ロ)-A.5.7 結果の要約及びその評価」に示す通り、自由落下により外容器外板は局所的に 25.4 mm 変形したことを踏まえ、外容器外板の半径を <input type="text"/> mm 縮めるとした。
線源領域		通常輸送時から変更しない	「(ロ)-A.5.7 結果の要約及びその評価」に示す通り自由落下により収納物の変形は起こらなかったため。



図(ロ)D-1 通常輸送時解析モデル



図(ロ)D-2 一般の試験条件下解析モデル

D.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

遮蔽解析モデルにおける領域は、線源及び外容器外板に分けられる。各領域の密度、組成及び原子個数密度を表(ロ)D-9に示す。

線源及び外容器外板以外の領域はすべて空気とした。

表(ロ)D-9 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	3.37	U	7.52×10^{-3}
			O	1.51×10^{-2}
	15×15型	3.26	U	7.27×10^{-3}
			O	1.45×10^{-2}
	17×17型タイプ64	3.22	U	7.19×10^{-3}
			O	1.44×10^{-2}
	17×17型タイプ57	3.34	U	7.44×10^{-3}
			O	1.49×10^{-2}
外容器外板 SUS304		7.86	Fe	6.08×10^{-2}
			Cr	1.73×10^{-2}
			Ni	7.46×10^{-3}

D.4 遮蔽評価

図(ロ)D- 1 及び図(ロ)D- 2 に示した遮蔽解析モデルについて QAD-CGGP2R ((ロ)D 参考資料 2) を用いて遮蔽評価を行った。

ガンマ線のエネルギー群分けについては、ORIGEN 2.2 ((ロ)D 参考資料 1) のエネルギー群構造と同じとした。本遮蔽評価でのビルドアップ係数は、空気のビルドアップ係数を使用した。

遮蔽評価では、Traveller XL 型輸送物の収納物である各燃料集合体 (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 1 m の点について最大値を示す評価点を探索「(ロ)D 付属資料 1」し、最大線量当量率を評価した。

評価結果を表(ロ)D- 10 に示す。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分かったため、17×17 型タイプ 57 収納時における通常輸送時及び一般の試験条件下の最大線量当量率を評価した。

このようにして求めた最大線量当量率の評価結果を表(ロ)D- 1 に示す。一般の試験条件下における最大線量当量率の増加割合は□%であり、著しく増加しない。

表(ロ)D- 10 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		
15×15 型		
17×17 型タイプ 64		
17×17 型タイプ 57		

D.5 結果の要約及びその評価

Traveller XL 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評価を実施した。

この結果、表(ロ)D- 1 に示すように、各条件における最大線量当量率は A 型輸送物に係る技術上の基準に規定されている値を超えることはなく、安全性に問題はない。

付属資料

1) (ロ)D 付属資料 1 最大線量当量率を与える評価点の検討

参考資料

- 1) (口)D 参考資料 1 ORIGEN 2.2 の概要
- 2) (口)D 参考資料 2 QAD-CGGP2R の概要

(口)D 付属資料 1

最大線量当量率を与える評価点の検討

1.概要

Traveller XL 型輸送物は収納物である PWR 用未照射燃料集合体を 1 体収納する。遮蔽評価においても各燃料集合体の燃料有効長部分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、Traveller XL 型輸送物の遮蔽評価では、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(ロ)D 付 1-1 に示すように、輸送物側面中央部については、周方向に輸送物の頂部を -45° として片側 135° まで行い、また、輸送物端部については、輸送物中心位置を中心に外容器外板表面までの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評価を実施した。

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(ロ)D 付 1-2 に示す。各燃料集合体とも、約 0° の方向で最大線量当量率を示すことが分かる。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 の点におい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(ロ)D 付 1-3 に示す。各燃料集合体とも、約 -45° の方向で最大線量当量率を示すことが分かる。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分かったため、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(ロ)D 付 1-4 及び図(ロ)D 付 1-5 に示す。

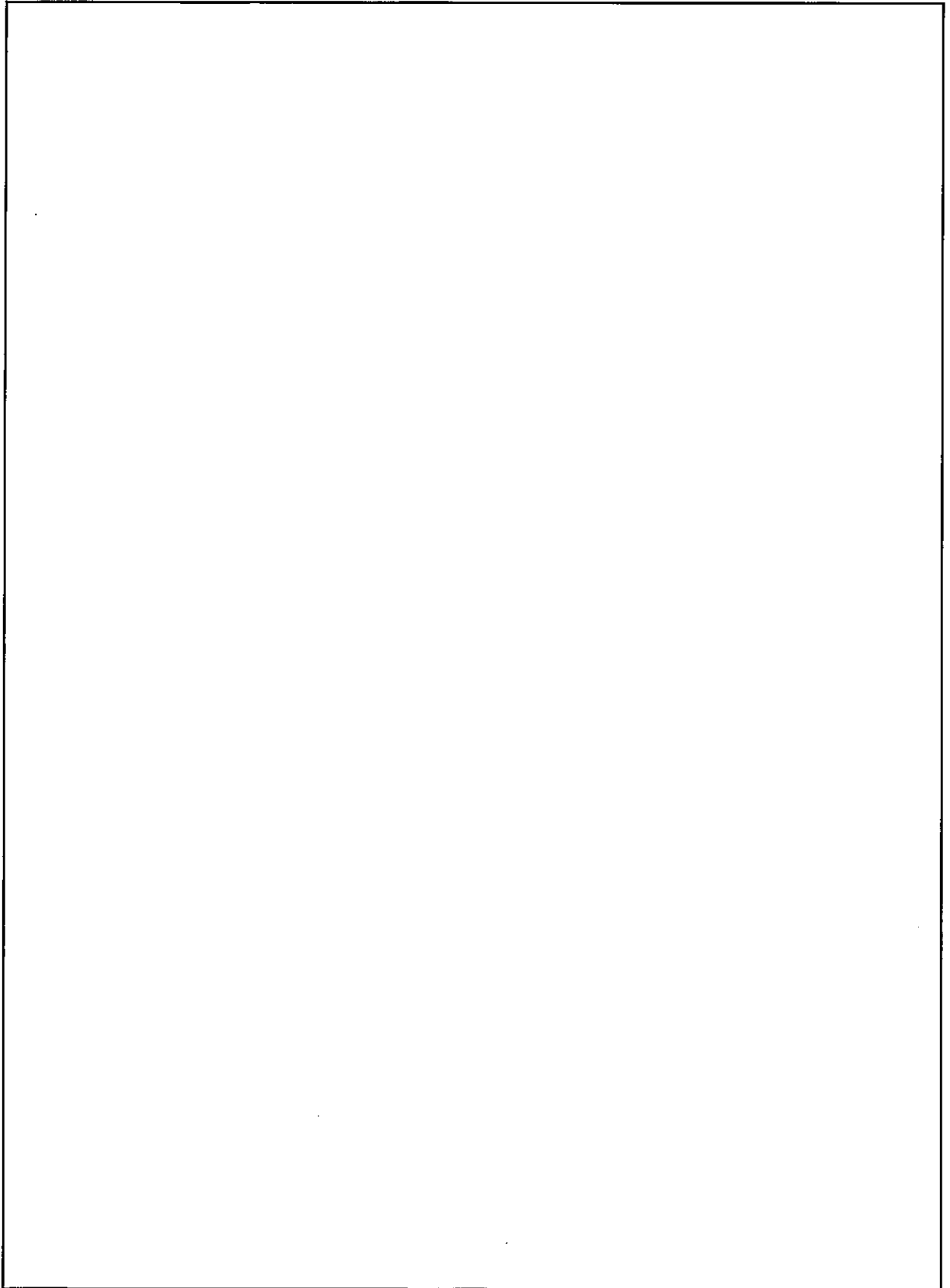
(4) 一般の試験条件下における輸送物側面中央部及び端部表面

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(ロ)D 付 1-6 及び図(ロ)D 付 1-7 に示す。

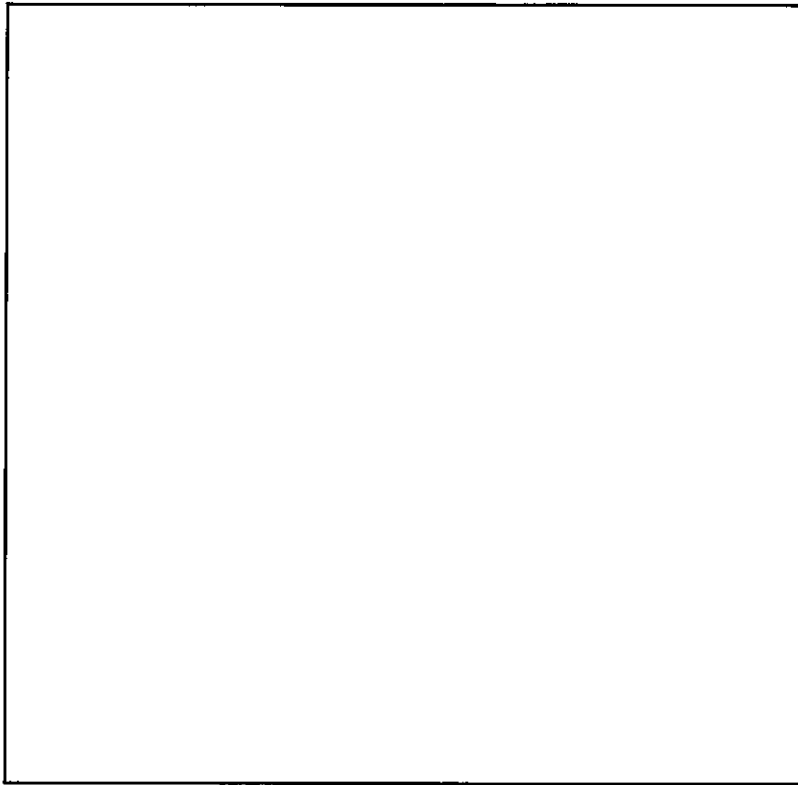
3. まとめ

PWR 用未照射燃料集合体を収納する Traveller XL 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。

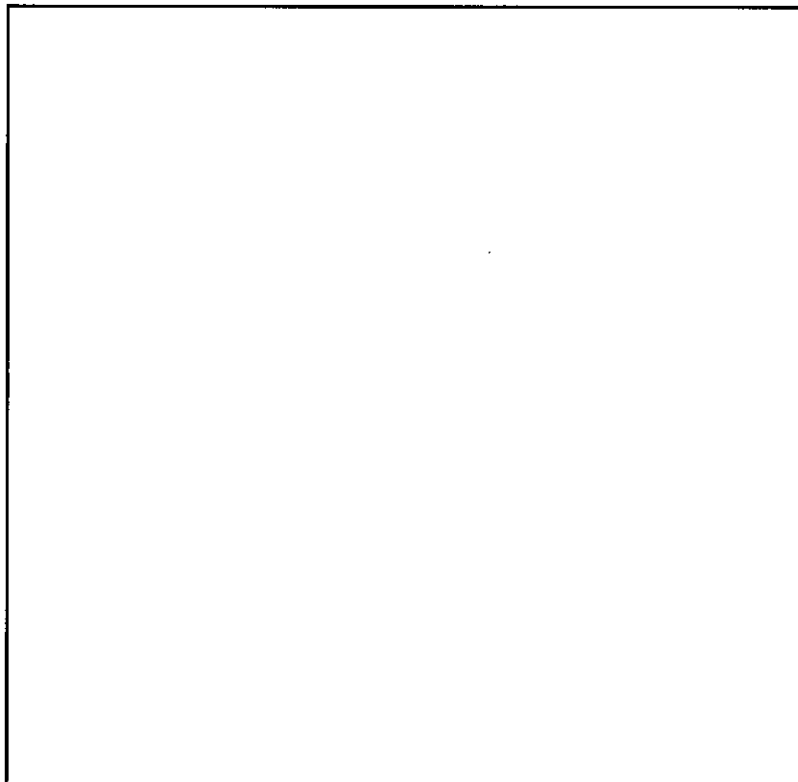
その結果、17×17 型タイプ 57 を収納した場合に最大線量当量率を示すこと、最大線量当量率は輸送物側部及び端部の表面、表面から 1 m の点においてともに輸送物中心から若干ずれた位置で得られることが分かった。



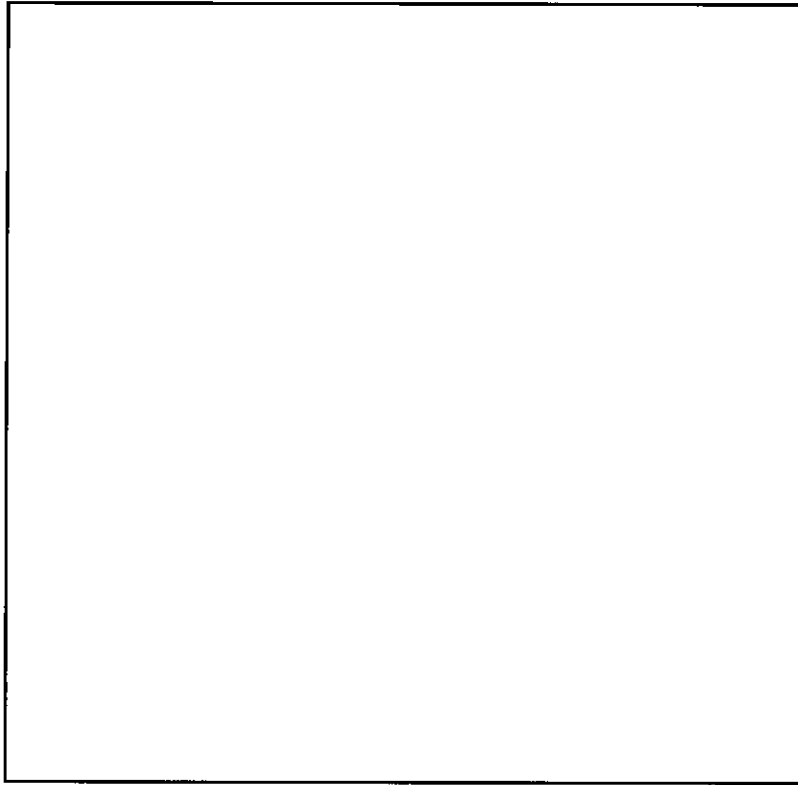
図(口)D 付 1-1 線量当量率評価点説明概略図



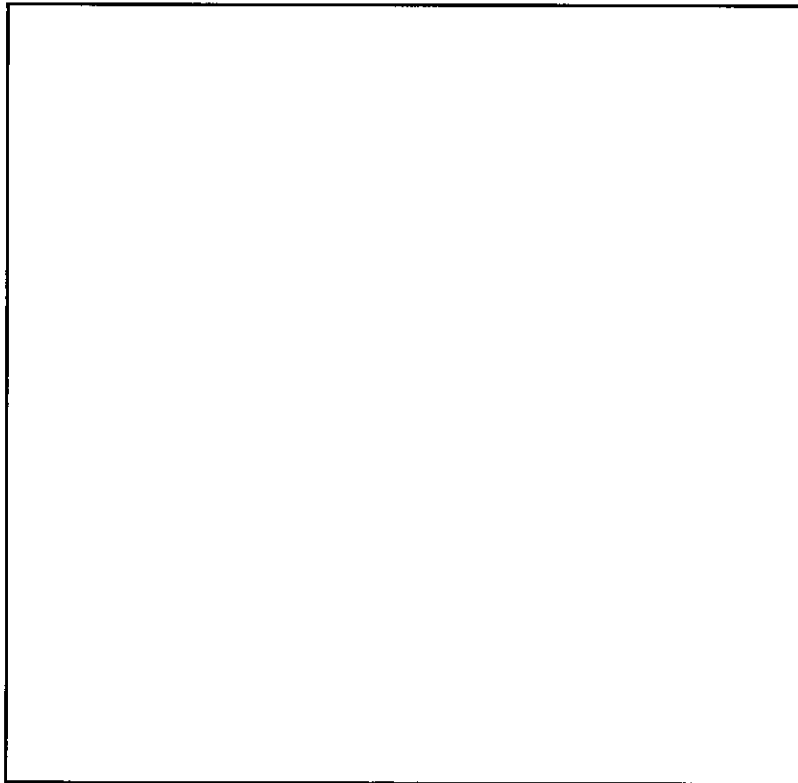
図(ロ)D 付 1-2 輸送物側面中央部評価結果 (通常輸送時)



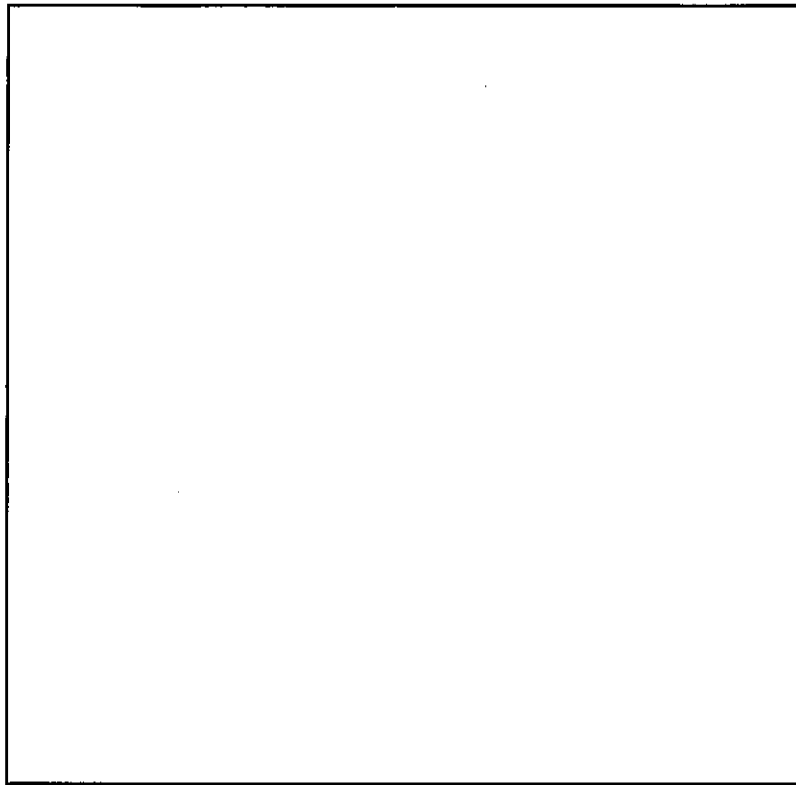
図(ロ)D 付 1-3 輸送物側面中央部から 1m の点評価結果 (通常輸送時)



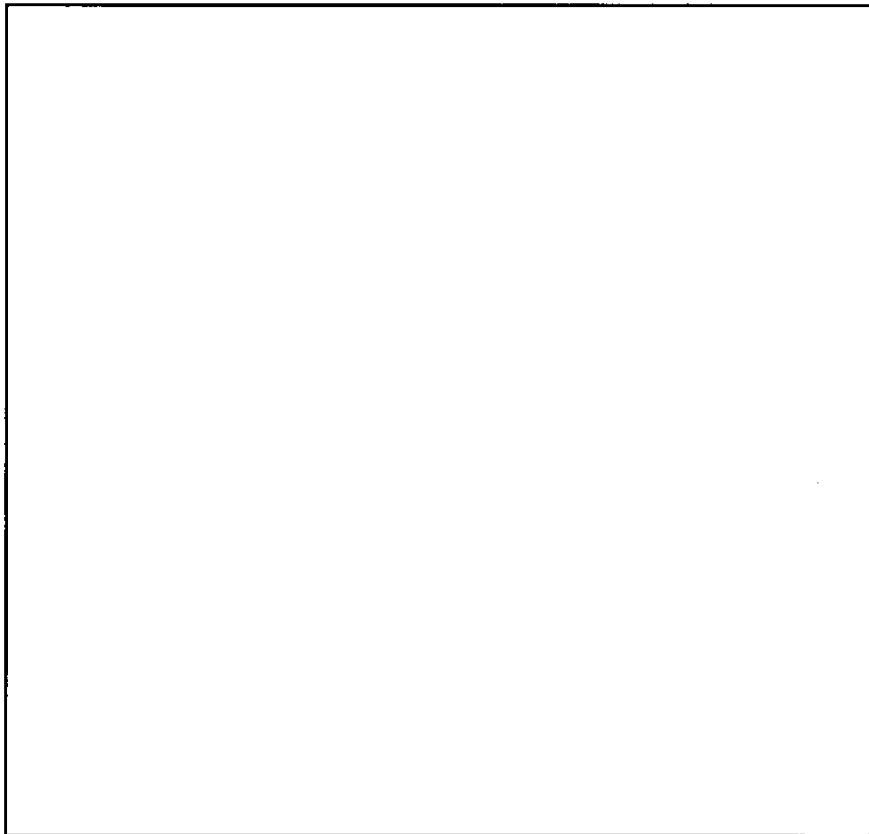
図(口)D 付 1-4 輸送物端部表面評価結果 (通常輸送時)



図(口)D 付 1-5 輸送物端部表面から 1m の点評価結果 (通常輸送時)



図(ロ)D 付 1-6 輸送物側面中央部評価結果 (一般の試験条件下)



図(ロ)D 付 1-7 輸送物端部表面評価結果 (一般の試験条件下)

(口)D 参考資料 1

ORIGEN 2.2 の概要

1.1 概要

ORIGEN 2.2 は、米国オークリッジ国立研究所で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)、アクチノイド、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。本輸送物の遮蔽評価では、ガンマ線の線源強度を計算するために用いる。

1.2 特長

本コードでは、核種の生成崩壊過程を下記に示す 1 階の微分方程式を解くことにより求める。

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N l_{ij}\lambda_j X_j + \phi \sum_{k=1}^N f_{ik}\sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi\sigma_i)X_i \quad \text{①}$$

$i = 1, 2, \dots, N$

- X_i : i 番目の核種の原子数密度
- l_{ij} : 核変換により j 番目の核種が i 番目の核種に変化する割合
- f_{ik} : 中性子捕獲過程により k 番目の核種が i 番目の核種に変化する割合
- λ_i : i 番目の核種の崩壊定数
- ϕ : エネルギー及び位置に関して平均した中性子束
- σ : スペクトル平均した i 番目の核種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となり、次式のように書ける。

$$\dot{\underline{X}} = A\underline{X} \quad \text{②}$$

②式において、 \underline{X} は X を成分に持つベクトルであり、 A は定数マトリクスである。

②式は、

$$\underline{X} = \exp(At) \underline{X}(0) \quad \text{③}$$

と解くことができる。ただし、 $\exp(At)$ は以下のように定義することができる。

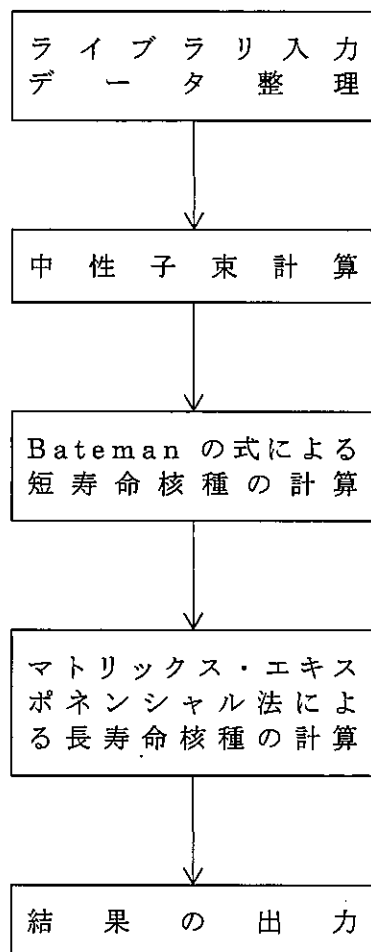
$$\exp(At) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(At)^m}{m!} \quad \text{④}$$

このような解法はマトリクス・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 \underline{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。

ORIGEN には以下のバージョンがある。

ORIGEN-73	(オリジナル)
ORIGEN-79	(ORIGEN-73 のライブラリ変更)
ORIGEN2	(ORIGEN-79 に各種機能の追加、改良)
ORIGEN2-82	(ORIGEN2 の不具合修正)
ORIGEN2-86	(ORIGEN2-82 のライブラリ変更)
ORIGEN2.1	(ORIGEN2-86 にライブラリ追加)
ORIGEN2.2	(ORIGEN2.1 の不具合修正)

本評価では、ORIGEN2.2 を使用した。ORIGEN の概略フロー・チャートを以下に示す。



ORIGEN のフローチャート

(口)D 参考資料 2

QAD-CGGP2R の概要

2.1 概要

QAD-CGGP2R 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 3 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 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 は 3 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 では線源及び遮蔽体形状として 3 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。

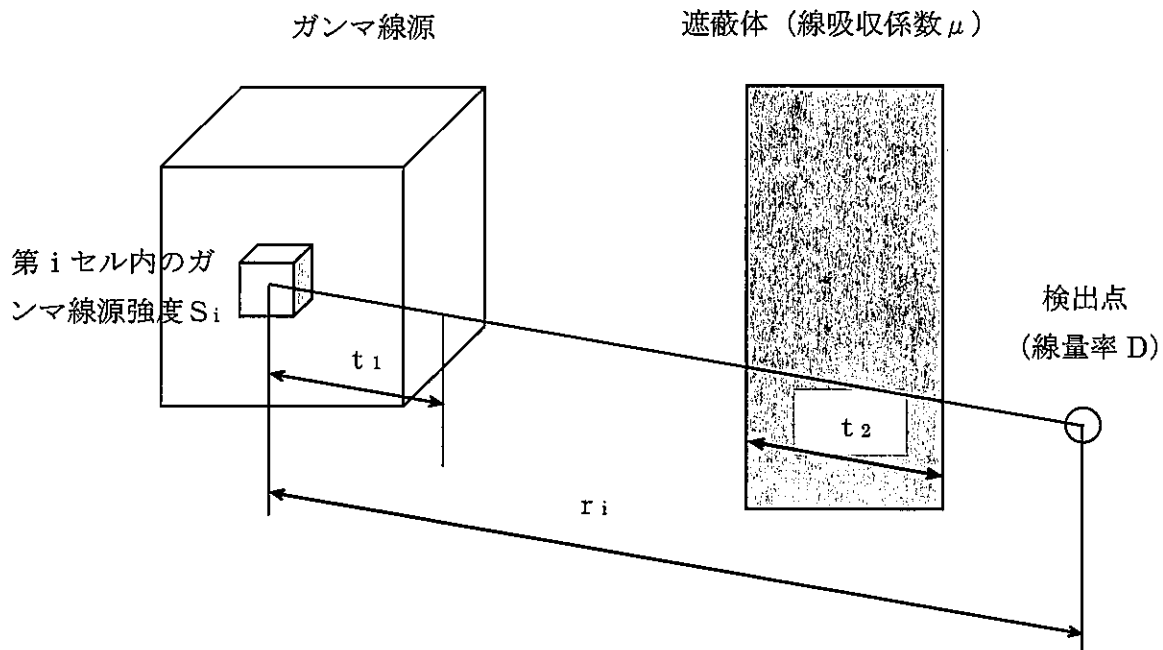
2.3 計算方法

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)



(ロ)E 臨界解析

E.1 概 要

本輸送容器に収納するのは、濃縮度 \square wt%以下の濃縮ウランを使用した PWR 用未照射燃料集合体であり、輸送制限個数を \square 個として、通常輸送時はもちろんのこと一般及び特別の試験条件下において臨界に達することがないように設計されている。

臨界評価にあたって、輸送物の中性子実効増倍率を求める解析には、臨界計算コード KENO-VI(参考文献(1))及び ENDF-B/VII をマスタライブラリとする 238 群ライブラリ(参考文献(2))を用いて、以下のいずれかの条件においても臨界に達しないことを評価した。

- 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、臨界評価の際、構造解析、熱解析等の評価結果等を考慮し、表(ロ)E-1 に示す安全側なモデル化を行った。さらに、配列系における輸送物配列数及び境界条件を表(ロ)E-2 に示す。

以上の評価条件に基づき得られた統計上の偏差を考慮した中性子実効増倍率の最大値は \square となった。この値は制限値の 0.95 未満であり、臨界安全上問題ないことを確認した。

表(ロ)E-1 一般及び特別の試験条件下における評価結果と臨界解析におけるモデル化 (1/6)

解析対象	構造解析、熱解析等の評価結果		臨界解析におけるモデル化		安全側な設定となる根拠
	解析項目	一般の試験条件下	特別の試験条件下	一般の試験条件下	
収納物	構造解析	収納物の形状、性質に変化等は確認されなかった。	燃料集合体の端部に付いて、下端から長さ508mmにわたって、燃料棒ピッチが拡大した。		
			燃料棒に亀裂、破損は発生しないと評価された。	燃料棒を密封境界として、燃料棒内へは浸水しないとしてモデル化する。	燃料棒内へ浸水するとしてモデル化する。
			燃料集合体はクラムシエルから飛び出ることなく、燃料棒の軸方向の移動範囲は、中性子吸収材 (BORAL®製板) が存在する高さ領域に留まっていた。		

表(ロ)E-1 一般及び特別の試験条件下における評価結果と臨界解析におけるモデル化 (2/6)

解析対象	構造解析、熱解析等の評価結果		臨界解析におけるモデル化		安全側な設定となる根拠
	一般の試験条件下	特別の試験条件下	一般の試験条件下	特別の試験条件下	
取納物		燃料集合体に大きな損傷は確認されなかつた。			
	熱解析	ポリエチレン製袋が溶融する温度とはならなかつた。			
	浸水試験	本章において、浸水を考慮した評価を実施するため、浸水試験は実施していない。	燃料棒を密封境界として、燃料棒内へは浸水しないとしてモデル化する。	燃料棒内へ浸水するとしてモデル化する。	

表(ロ)E-1 一般及び特別の試験条件下における評価結果と臨界解析におけるモデル化 (3/6)

解析対象	構造解析、熱解析等の評価結果		臨界解析におけるモデル化		安全側な設定となる根拠
	解析項目	一般の試験条件下	特別の試験条件下	一般の試験条件下	
収納物	その他				

表(ロ)E-1 一般及び特別の試験条件下における評価結果と臨界解析におけるモデル化 (4/6)

解析対象	構造解析、熱解析等の評価結果		臨界解析におけるモデル化		安全側な設定となる根拠
	解析項目	一般の試験条件下	特別の試験条件下	一般の試験条件下	
輸送容器	構造解析	局所的な変形に留まっており、輸送容器の形状、性質に変化等は特に確認されなかった。	下部ノズル側端部以外の変形は局所的な変形に留まっていた。 下部ノズル側端部が最大で 50.8mm 変形圧縮した。 クラムシエルに変形は生じず、所定の位置から移動しなかった。		
	熱解析	輸送容器の形状、性質に変化等は特に確認されなかった。	発泡ポリウレタンの一部は消失及び炭化した。		

表(ロ)E-1 一般及び特別の試験条件下における評価結果と臨界解析におけるモデル化 (5/6)

解析対象	構造解析、熱解析等の評価結果		臨界解析におけるモデル化		安全側な設定となる根拠
	解析項目	一般の試験条件下	特別の試験条件下	一般の試験条件下	
輸送容器	熱解析	輸送容器の形状、性質に変化等は特に確認されなかった。	減速材ブロックの質量の減少は認められず、健全性が損なわれることはなかった。 クラムシエールに損傷は認められなかった。		
	浸水試験		本章において、浸水を考慮した評価を実施するため、浸水試験は実施していない。		
	その他		—		

表(ロ)E-1 一般及び特別の試験条件下における評価結果と臨界解析におけるモデル化 (6/6)

解析対象	構造解析、熱解析等の評価結果		臨界解析におけるモデル化		安全側な設定となる根拠
	解析項目	一般の試験条件下	特別の試験条件下	一般の試験条件下	
中性子吸収材	構造解析	中性子吸収材 (BORAL®製板) の性質に変化等は特に確認されず、所定の位置からの移動も確認されなかった。	特別の試験条件下		
	熱解析	中性子吸収材 (BORAL®製板) の性質に変化等は特に確認されなかった。			
	浸水試験	クラムシエールが密封境界となっているため、中性子吸収材 (BORAL®製板) 内には浸水しない。			
	その他	—			

表(ロ)E-2 臨界評価における輸送物配列数及び境界条件

試験条件	項目	条件
一般の試験条件	輸送物配列数	径方向： <input type="text"/> 個 軸方向： <input type="text"/> 段
	境界条件	径方向：水反射体 <input type="text"/> 軸方向上面：水反射体 <input type="text"/> 軸方向下面：完全反射
特別の試験条件	輸送物配列数	径方向： <input type="text"/> 個 軸方向： <input type="text"/> 段
	境界条件	径方向：水反射体 <input type="text"/> 軸方向上面：水反射体 <input type="text"/> 軸方向下面：完全反射

E.2 解析対象

E.2.1 収納物

本輸送物の収納物は濃縮度 \square wt%以下の PWR 用未照射燃料集合体であり、その仕様を表 (口)E-3 に示す。燃料集合体は表面の保護のため、ポリエチレン製袋を側面に巻いた状態で収納されることがある。

一般の試験条件下における収納物の形状、性質の変化等はないことが確認されているが、特別の試験条件下における収納物の形状、性質の変化等として表(口)E-1 に示す結果が確認されている。

表(ロ)E-3 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□wt%以下 の UO ₂	同 左	同 左	同 左
ペレット直径	9.21 mm	9.21 mm	8.05 mm	8.19 mm
ペレット密度	97%TD 以下	同 左	95%TD	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	ジルカロイ-4 及び ジルコニウム合金	同 左	ジルカロイ-4	ジルカロイ-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	14.12 mm	14.30 mm	12.60 mm	同 左

E.2.2 輸送容器

本輸送容器は図(イ)-1に示すような円筒形状で、外容器及びクラムシエルから構成され、それらの主要構造材を表(ロ)E-4に示す。クラムシエル内部に1体の燃料集合体を収納することができ、減速材ブロックは水平、傾斜落下時にクラムシエル及び収納物の衝撃を吸収する機能とともに、収納物間の中性子相互作用を抑える機能のために、配置されている。

一般の試験条件下における輸送容器の形状、性質の変化等はないことが確認されているが、特別の試験条件下における輸送容器の形状、性質の変化等として表(ロ)E-1に示す結果が確認されている。

表(ロ)E-4 輸送容器の主要構造材

区分	主要構造材	材質
外容器	外板	ステンレス鋼
	内板	ステンレス鋼
	発泡ポリウレタン (衝撃吸収材)	発泡ポリウレタン
	減速材ブロック	超高分子量ポリエチレン
クラムシエル	クラムシエル	アルミニウム

E.2.3 中性子吸収材

本輸送物にはBORAL®製板がクラムシエルの各側面の内側表面に1枚ずつ(合計4枚)配置されている。BORAL®製板は B_4C とアルミニウム合金から構成される中性子吸収材であり、 B_4C を含むアルミニウム合金の芯部と B_4C を含まないアルミニウム合金の被覆部により構成されている。

一般の試験条件下及び特別の試験条件下におけるBORAL®製板の形状、性質の変化等として表(ロ)E-1に示す結果が確認されている。

E.3 モデル仕様

E.3.1 解析モデル

(1) 孤立系

孤立系の評価は、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

配列系の評価は、本輸送物の輸送制限個数は□個であるため、一般の試験条件下においては□個以上の輸送物を、特別の試験条件下においては□個以上の輸送物を配列した体系にて行う。その際の具体的な輸送物配列数及び境界条件を表(ロ)E-2に示す。

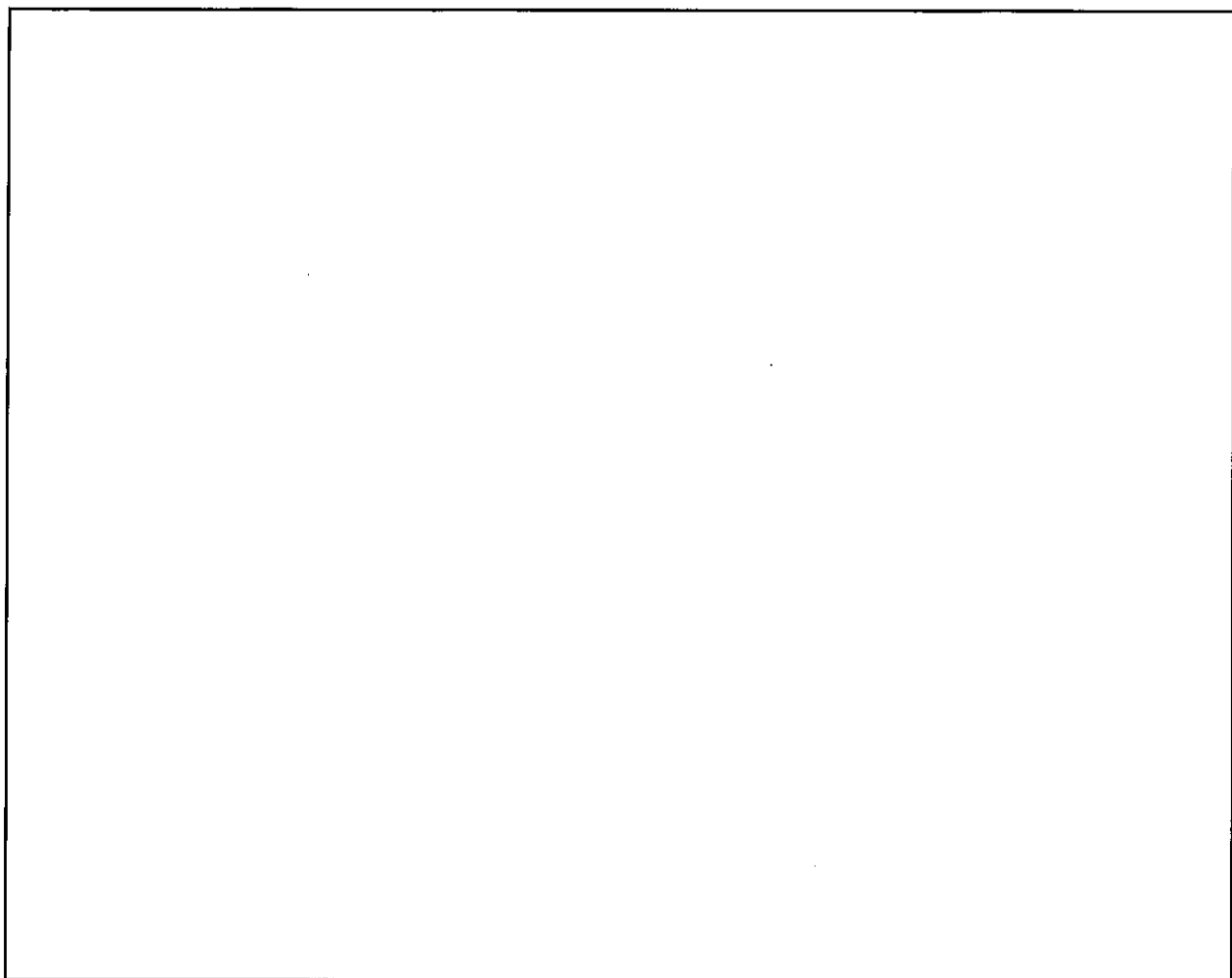
次に、一般の試験条件下における輸送物及び特別の試験条件下における輸送物の配列系における解析モデルを示す。

① 一般の試験条件下における輸送物

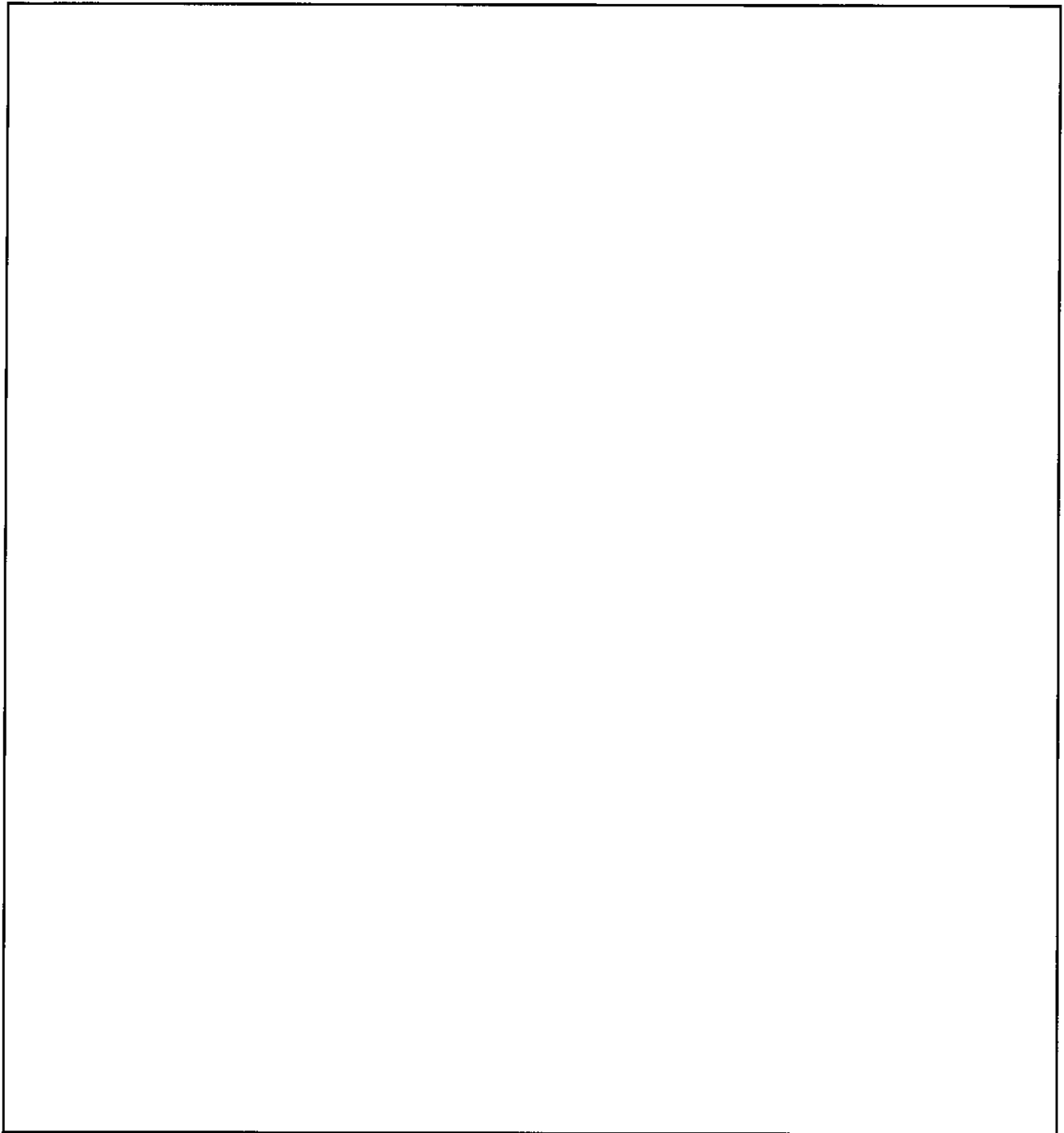
一般の試験条件下における輸送物においては、「(ロ)E.2」で得られた結果等を反映し、表(ロ)E-1及び表(ロ)E-2に示すモデル化を行った。このモデル化を基に作成した形状モデルを図(ロ)E-1に、燃料集合体の評価条件を表(ロ)E-5から表(ロ)E-8に示す。

② 特別の試験条件下における輸送物

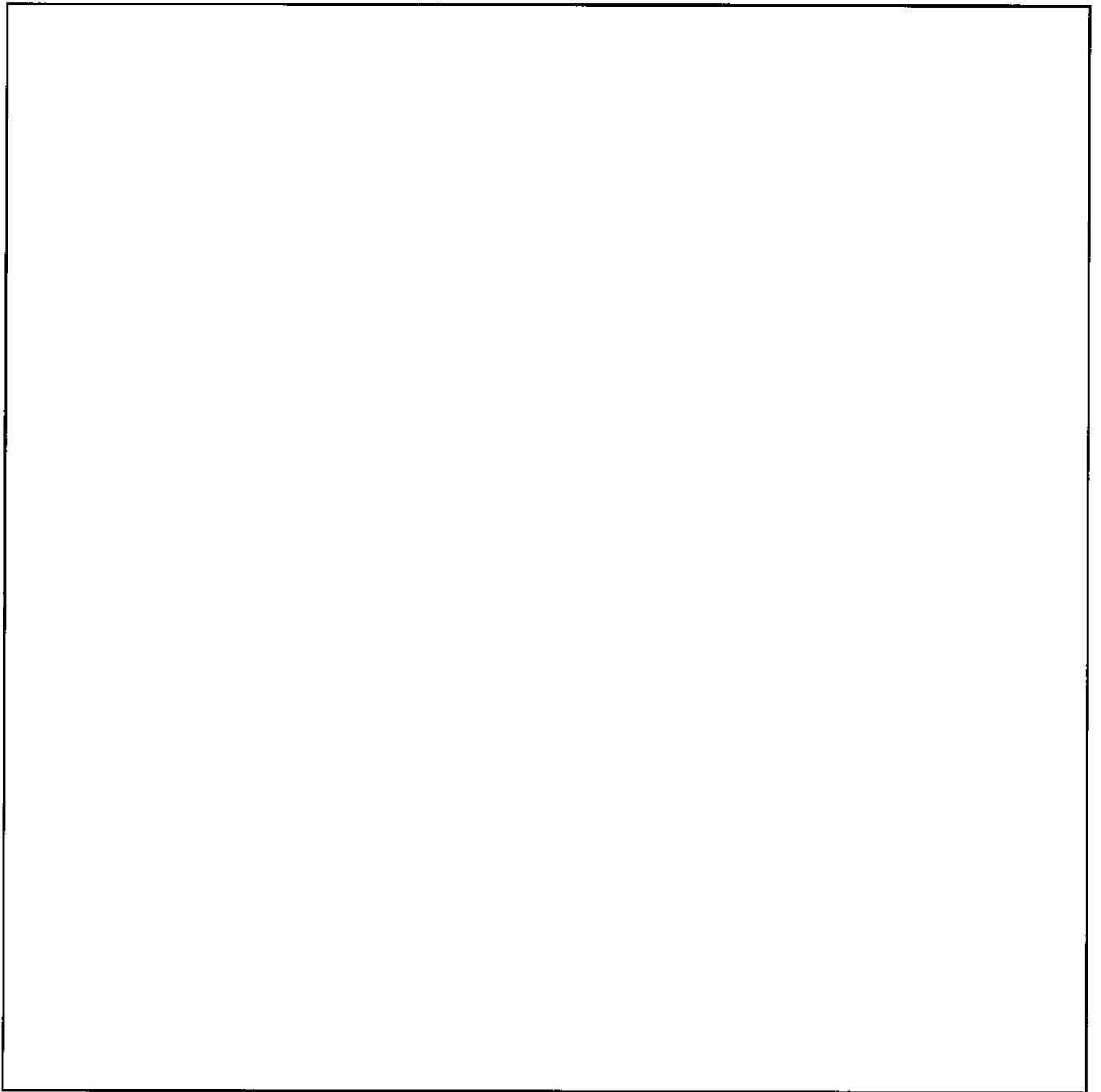
特別の試験条件下における輸送物については、「(ロ)E.2」で得られた結果等を反映し、表(ロ)E-1及び表(ロ)E-2に示すモデル化を行った。このモデル化を基に作成した形状モデルを図(ロ)E-2に、燃料集合体の評価条件を表(ロ)E-5から表(ロ)E-8に示す。



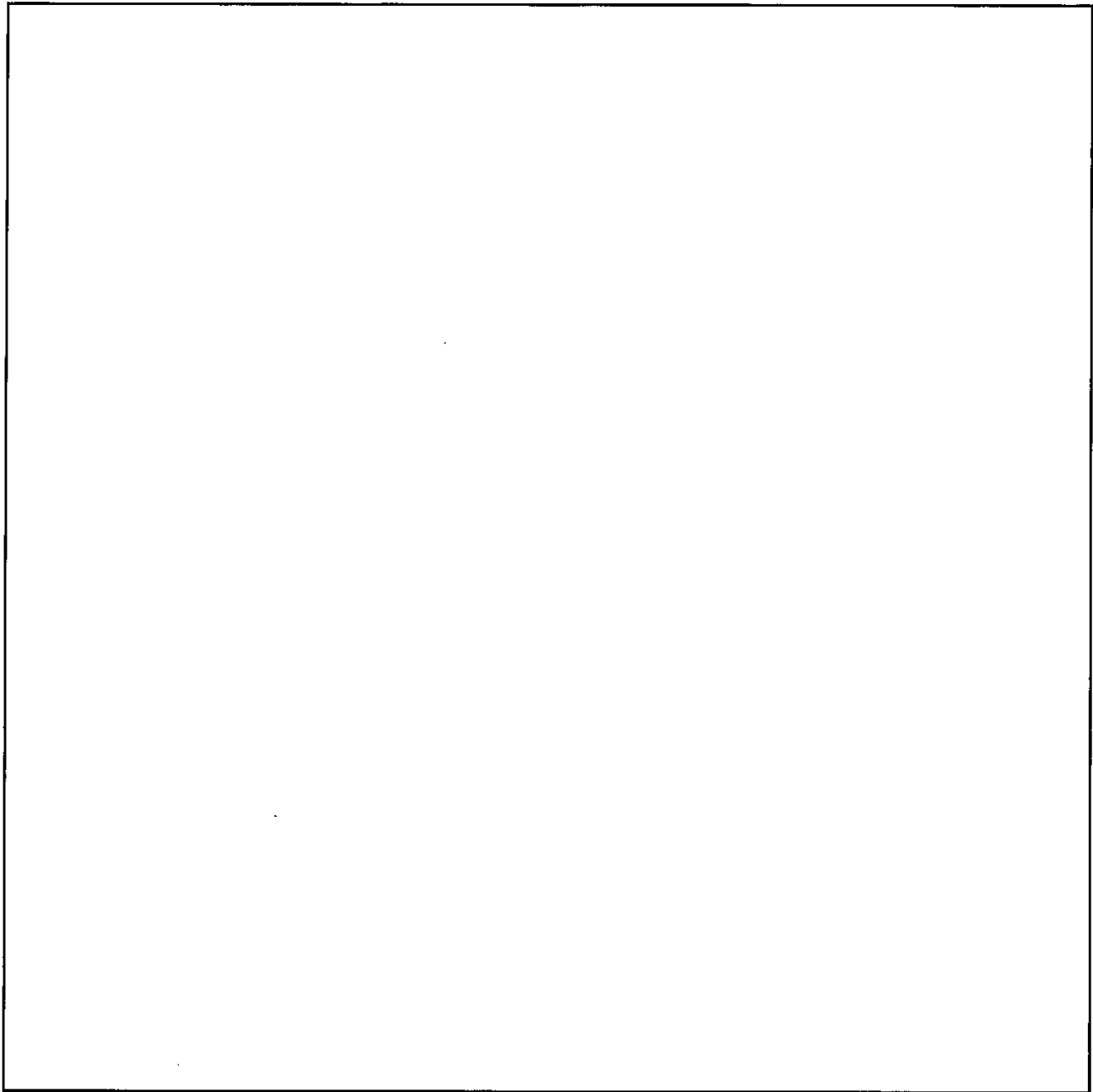
図(ロ)E-1(1/7) 一般の試験条件下における配列系の形状モデル (全体・軸方向)



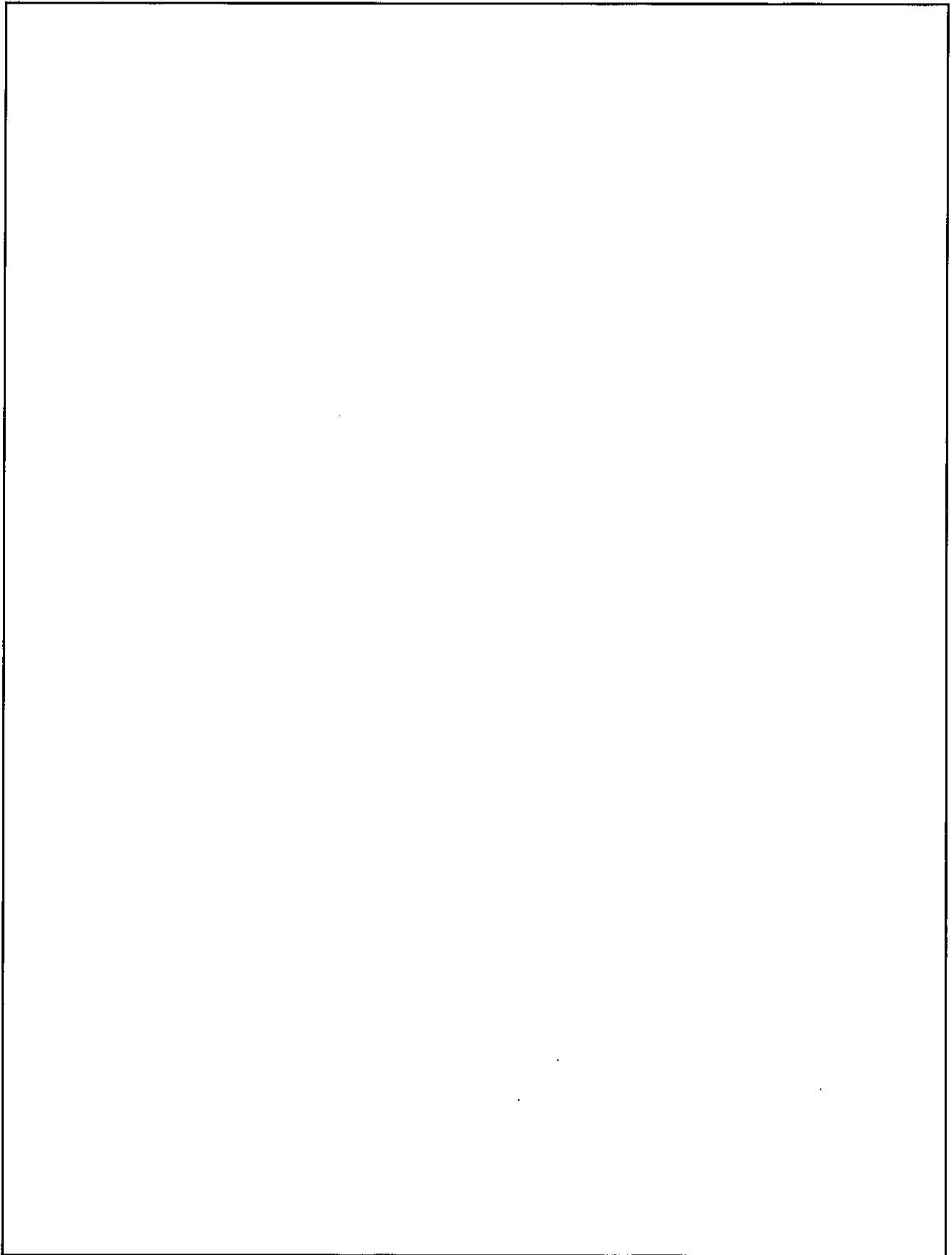
図(ロ)E-1(2/7) 一般の試験条件下における配列系の形状モデル (全体・径方向)



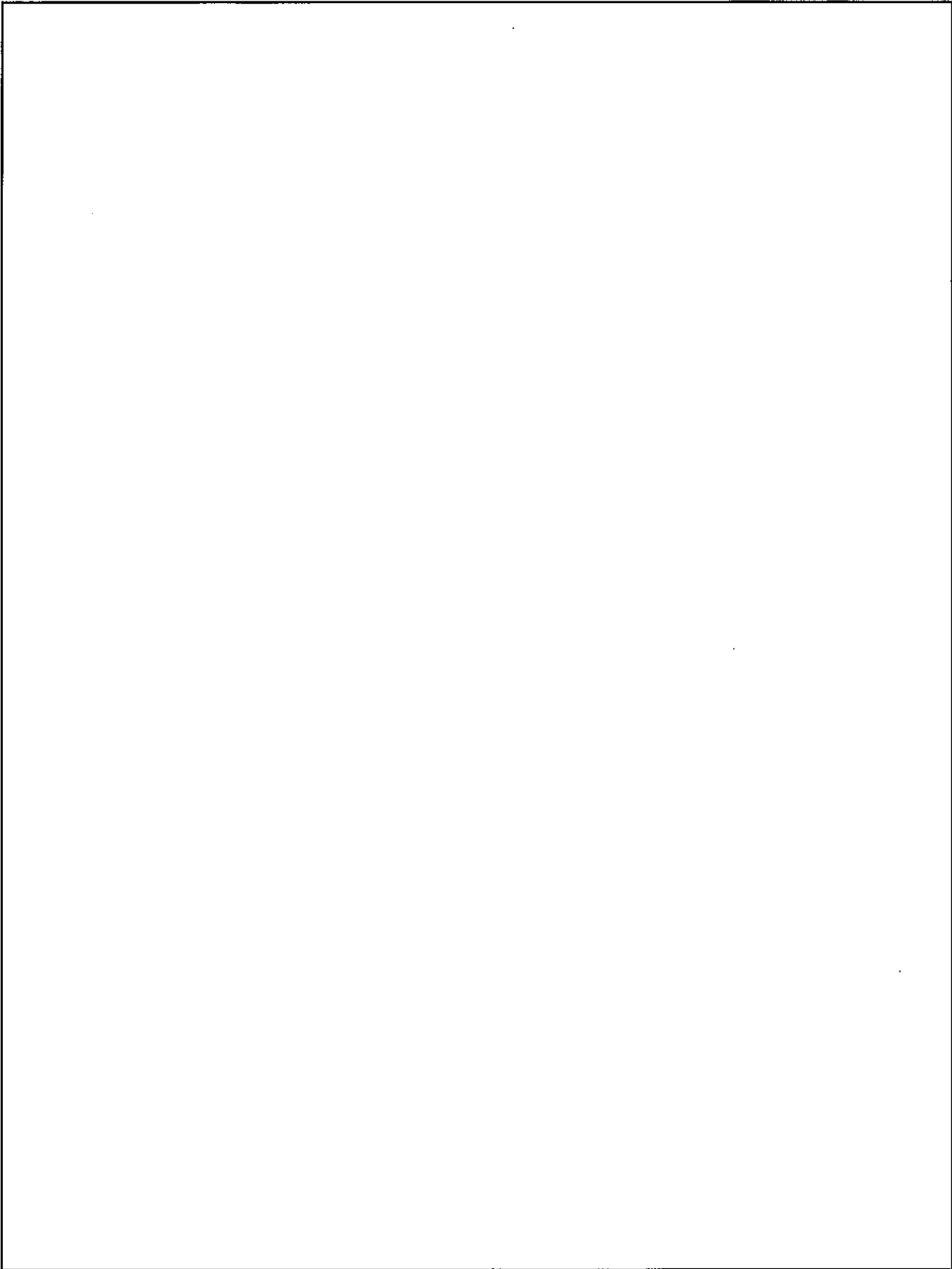
図(ロ)E-1(3/7) 一般の試験条件下における配列系の形状モデル
(輸送容器・径方向・ノミナル領域(1/2))



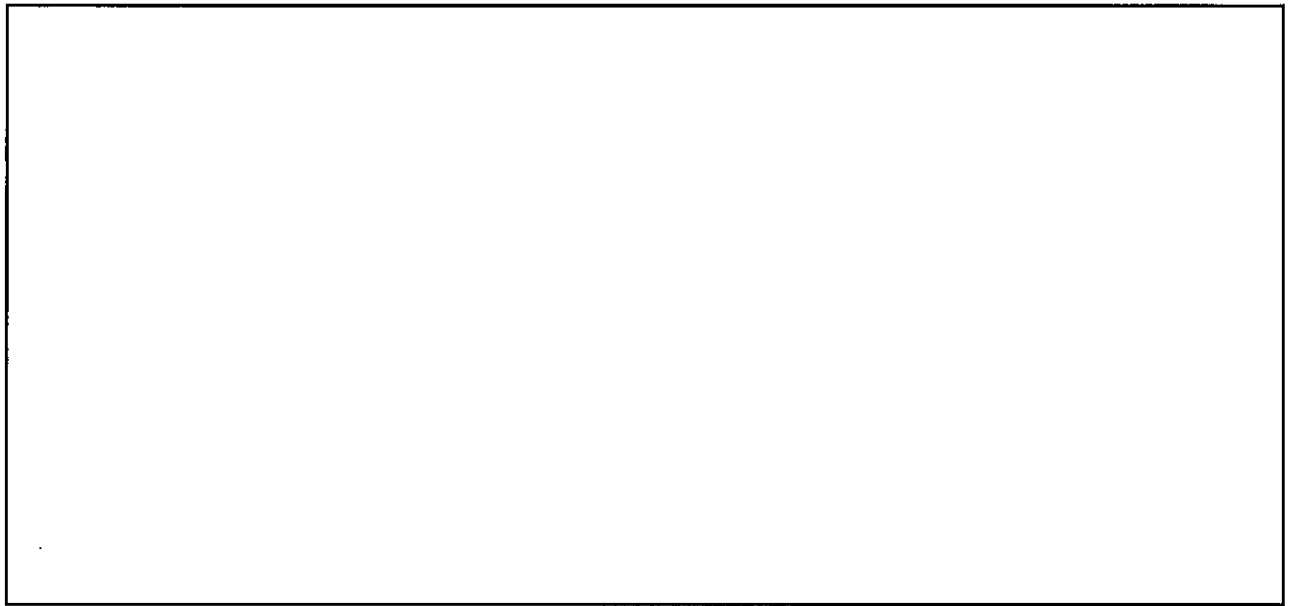
図(ロ)E-1(4/7) 一般の試験条件下における配列系の形状モデル
(輸送容器・径方向・ノミナル領域(2/2))



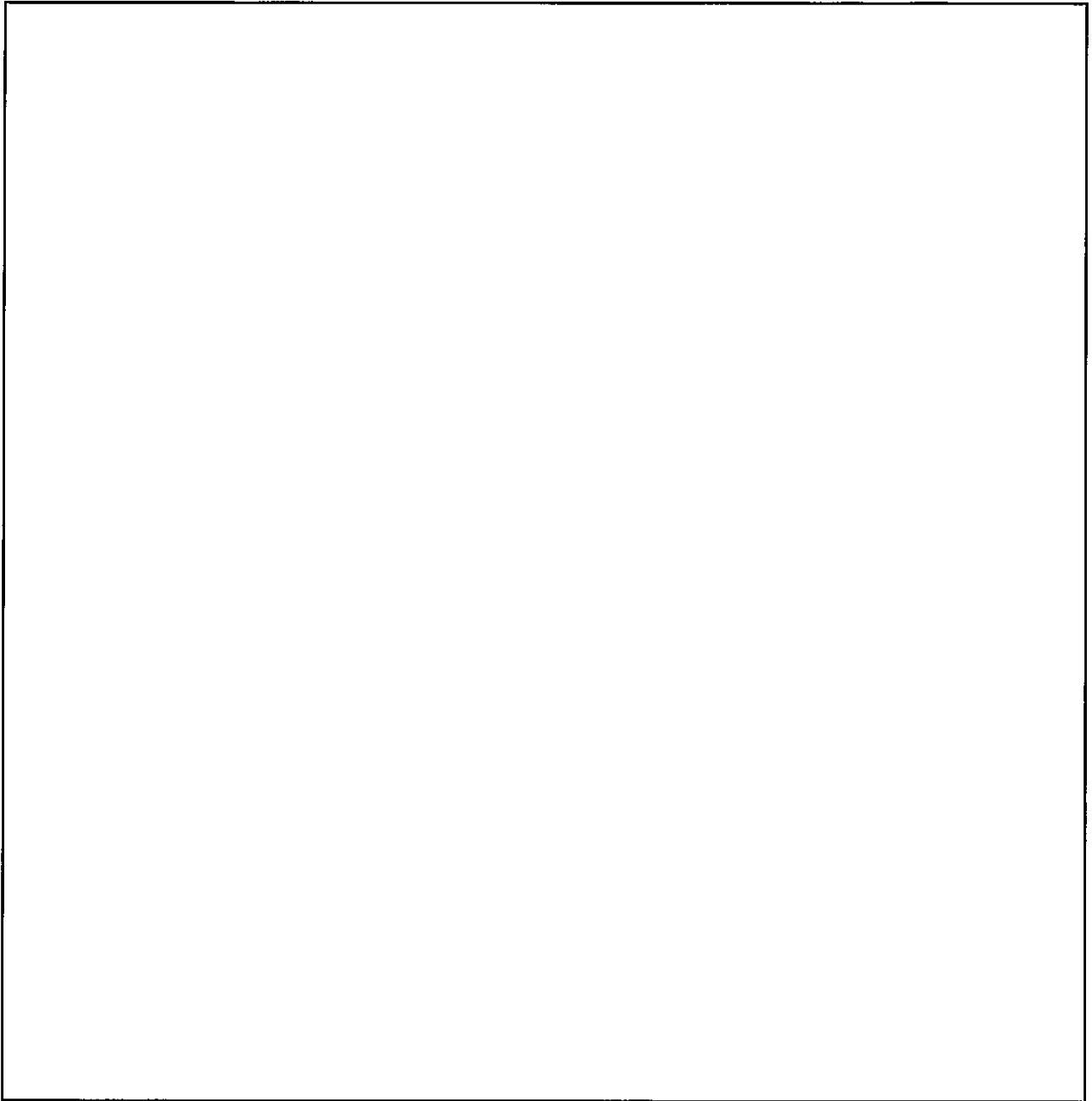
図(ロ)E-1(5/7) 一般の試験条件下における配列系の形状モデル (輸送容器・軸方向)



図(ロ)E-1(6/7) 一般の試験条件下における配列系の形状モデル
(輸送容器・軸方向・減速材ブロックショックマウント部)



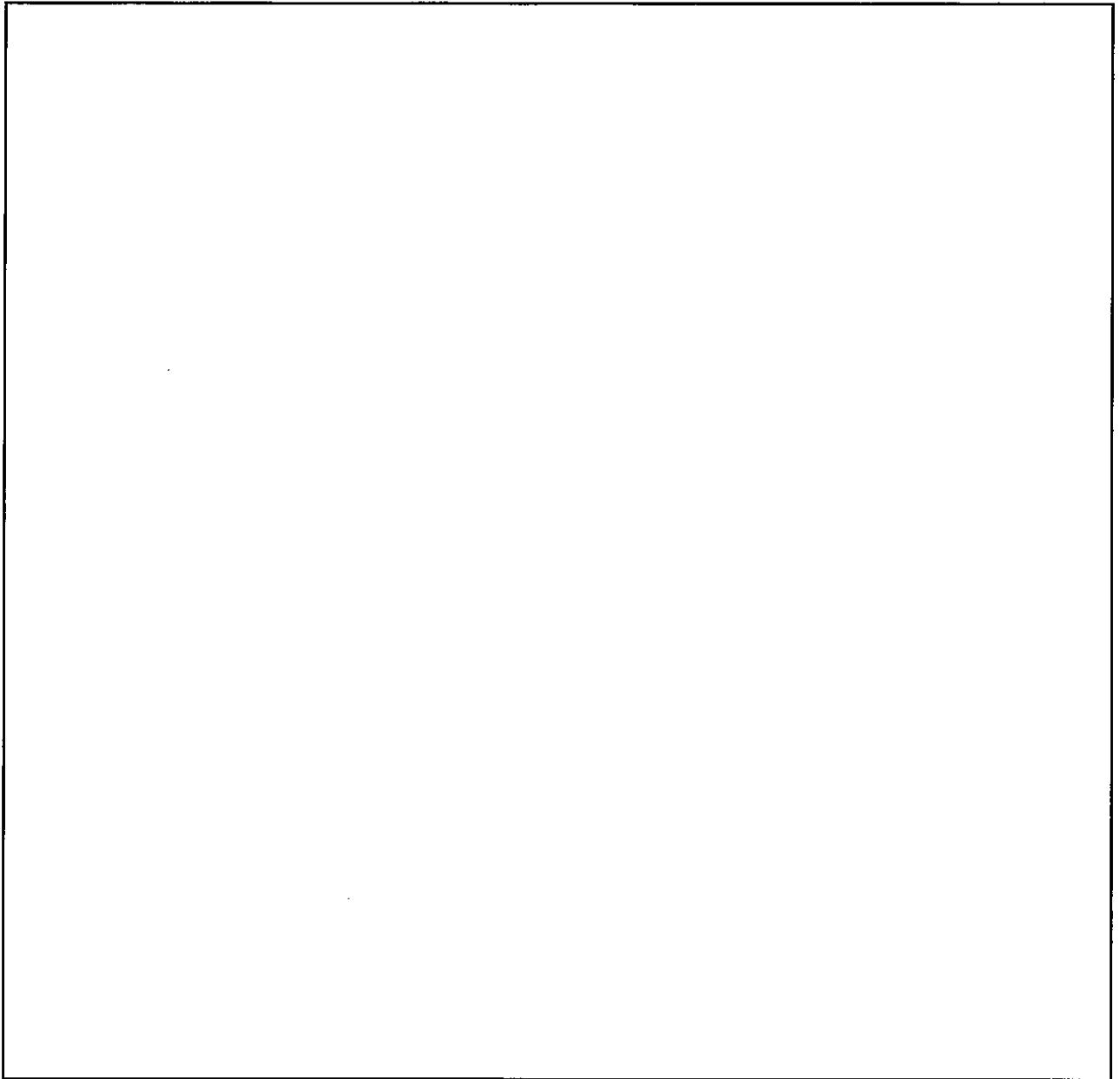
図(ロ)E-1(7/7) 一般の試験条件下における配列系の形状モデル(BORAL®製板・径方向断面図)



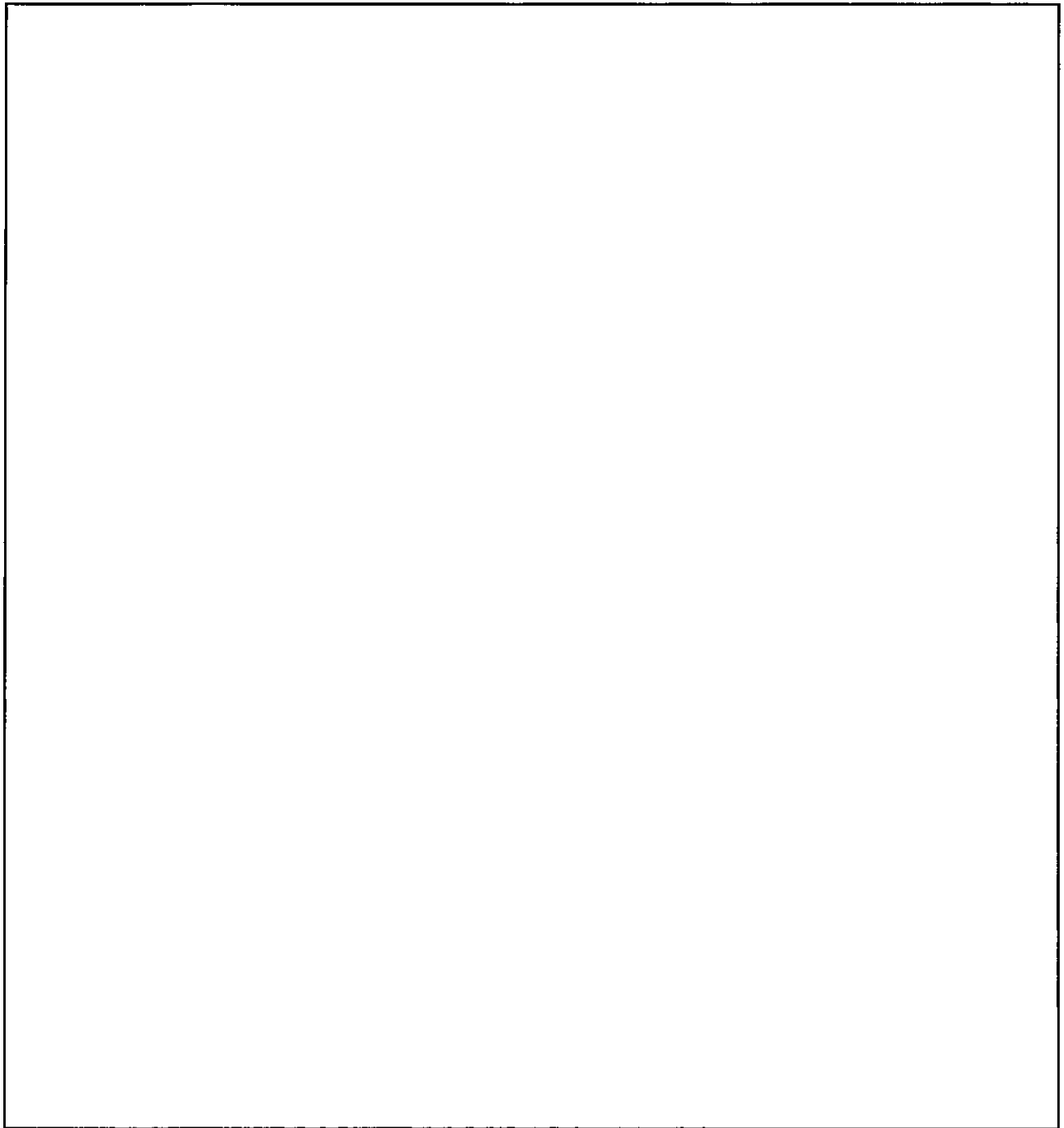
図(ロ)E-2(1/7) 特別の試験条件下における配列系の形状モデル (全体・軸方向)



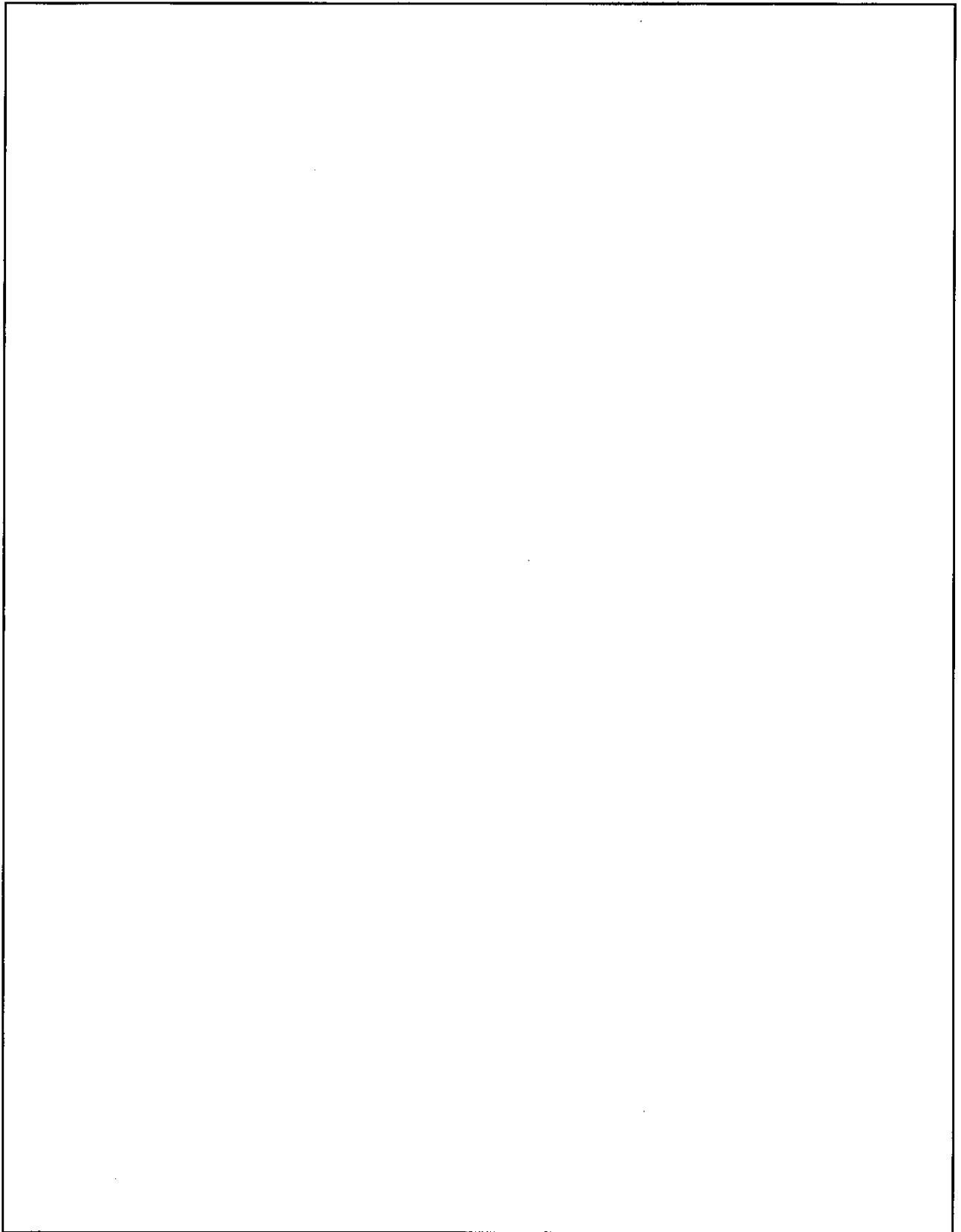
図(ロ)E-2(2/7) 特別の試験条件下における配列系の形状モデル (全体・径方向)



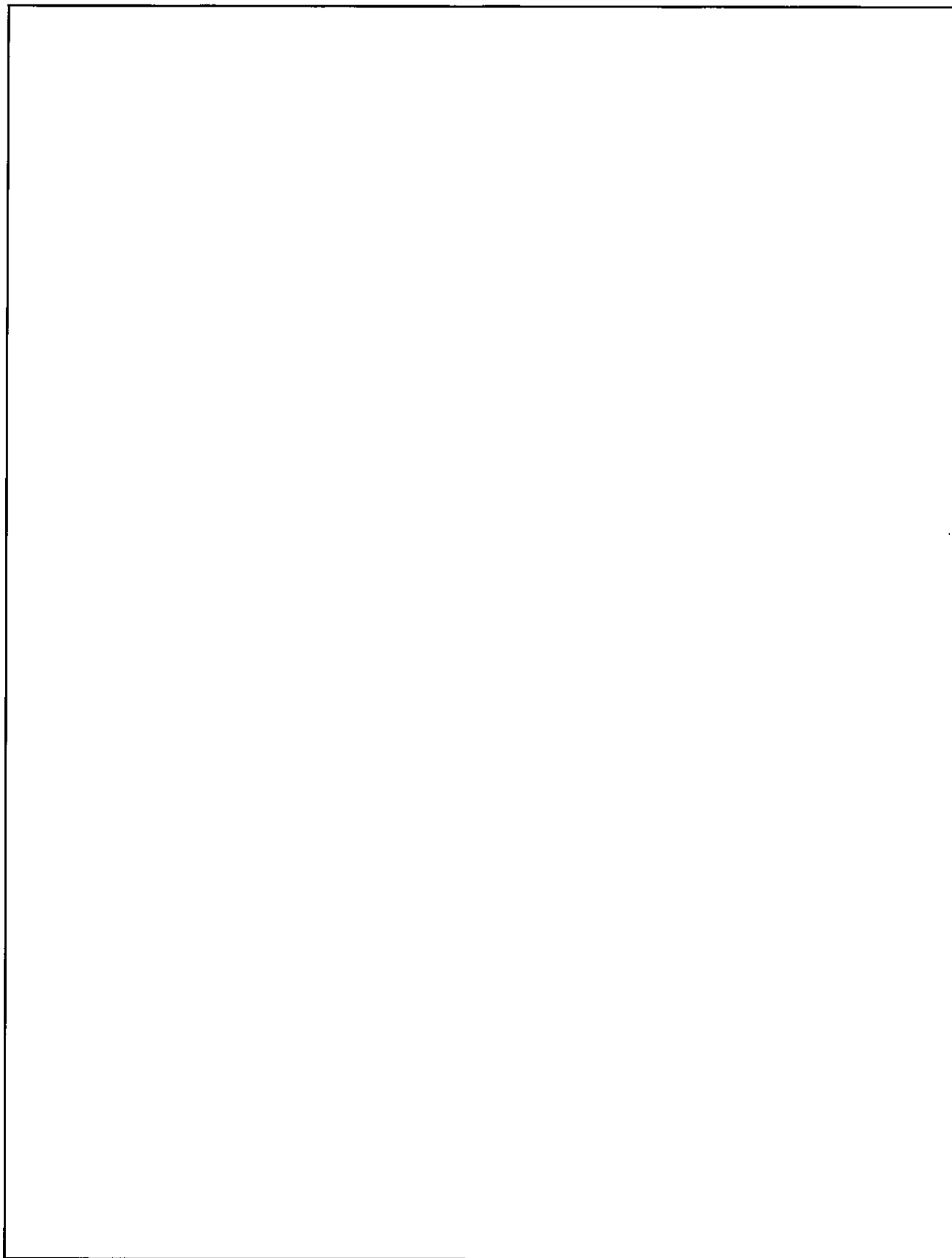
図(ロ)E-2(3/7) 特別の試験条件下における配列系の形状モデル
(輸送容器・径方向・ノミナル領域)



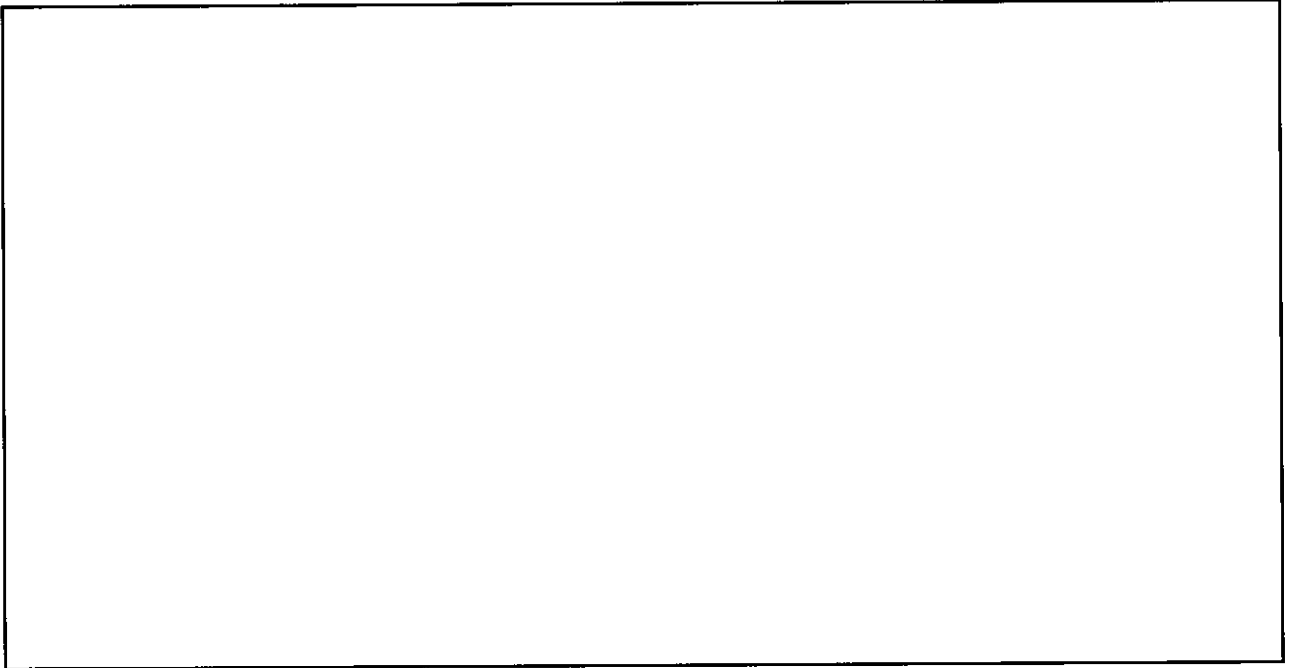
図(ロ)E-2(4/7) 特別の試験条件下における配列系の形状モデル
(輸送容器・径方向・拡張領域)



図(ロ)E-2(5/7) 特別の試験条件下における配列系の形状モデル
(輸送容器・軸方向)



図(ロ)E-2(6/7) 特別の試験条件下における配列系の形状モデル
(輸送容器・軸方向・減速材ブロックショックマウント部)



図(ロ)E-2(7/7) 特別の試験条件下における配列系の形状モデル(BORAL®製板・径方向断面図)

表(ロ)E-5 燃料集合体の評価条件 (14×14型)

項目		ノミナル値 (mm)	解析使用値(mm)	
			一般の試験条件下	特別の試験条件下
ペレット 直径	ノミナル領域	9.21		
	拡張領域			
燃料有効長		3,642		
被覆管外径		10.72		
被覆管内径		9.40		
燃料棒 ピッチ	ノミナル領域	14.12		
	拡張領域			
ポリエチレン製袋領域高さ		—		

表(ロ)E-6 燃料集合体の評価条件 (15×15型)

項目		ノミナル値 (mm)	解析使用値(mm)	
			一般の試験条件下	特別の試験条件下
ペレット 直径	ノミナル領域	9.21		
	拡張領域			
燃料有効長		3,642		
被覆管外径		10.72		
被覆管内径		9.40		
燃料棒 ピッチ	ノミナル領域	14.30		
	拡張領域			
ポリエチレン製袋領域高さ		—		

表(ロ)E-7 燃料集合体の評価条件 (17×17型タイプ 64)

項目		ノミナル値 (mm)	解析使用値(mm)	
			一般の試験条件下	特別の試験条件下
ペレット 直径	ノミナル領域	8.05	[Blank Area]	
	拡張領域			
燃料有効長		3,648		
被覆管外径		9.50		
被覆管内径		8.22		
燃料棒 ピッチ	ノミナル領域	12.60		
	拡張領域			
ポリエチレン製袋領域高さ		—		

表(ロ)E-8 燃料集合体の評価条件 (17×17型タイプ 57)

項目		ノミナル値 (mm)	解析使用値(mm)	
			一般の試験条件下	特別の試験条件下
ペレット 直径	ノミナル領域	8.19	[Blank Area]	
	拡張領域			
燃料有効長		3,648		
被覆管外径		9.50		
被覆管内径		8.36		
燃料棒 ピッチ	ノミナル領域	12.60		
	拡張領域			
ポリエチレン製袋領域高さ		—		

E.3.2 解析モデル各領域における原子個数密度

本評価に使用した輸送物の各領域の原子個数密度を表(ロ)E-9に示す。

表(ロ)E-9 計算に使用した各領域の原子個数密度

材質	核種	原子個数密度 (atoms/barn-cm)
UO ₂ ペレット (²³⁵ U濃縮度: <input type="text"/> wt%、 ペレット密度: 10.96g/cm ³)	²³⁵ U	1.23762E-03
	²³⁸ U	2.32178E-02
	O	4.89105E-02
被覆管 (ジルカロイ-4、 密度: 6.56g/cm ³)	Cr	7.59676E-05
	Fe	1.48548E-04
	Zr	4.25257E-02
	Sn	4.82381E-04
	Hf	2.21323E-06
ポリエチレン製袋 (密度: 0.922g/cm ³)	H	<input type="text"/>
	C	
水 (密度: 1.0g/cm ³)	H	6.68718E-02
	O	3.34359E-02
ステンレス鋼 (密度: 8g/cm ³)	C	1.60442E-04
	Si	8.57515E-04
	P	3.57742E-05
	S	2.25342E-05
	Cr	1.76022E-02
	Mn	8.76935E-04
	Fe	6.05345E-02
	Ni	7.58927E-03
BORAL®製板 芯部 (密度: 2.5g/cm ³)	¹⁰ B	<input type="text"/>
	¹¹ B	
	C	
	Al	
	Si	
	Mn	
	Fe	
	Cu	
	Zn	
	BORAL®製板 被覆部 (密度: 2.71g/cm ³)	
Si		
Mn		
Fe		
Cu		
Zn		
減速材ブロック (ポリエチレン、 密度: 0.9108g/cm ³)	H	<input type="text"/>
	C	
クラムシエル (アルミニウム、 密度: 2.702g/cm ³)	Al	6.03067E-02

E.4 未臨界評価

E.4.1 計算条件

収納物、輸送容器及び中性子吸収材のモデル化が、未臨界評価上安全側であることを以下に示す。

(1) 収納物

収納物のモデル化について、表(ロ)E-1の「収納物」に示す安全側なモデル化を行った。

(2) 輸送容器

輸送容器のモデル化について、表(ロ)E-1の「輸送容器」に示す安全側なモデル化を行った。

(3) 中性子吸収材

中性子吸収材のモデル化について、表(ロ)E-1の「中性子吸収材」に示す安全側なモデル化を行った。

なお、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。

- ・ 構造解析の結果、収納物である燃料集合体には亀裂、破損が生じないという結果であったが、すべての燃料棒内への浸水を考慮する。
- ・ 耐火試験の結果、ポリエチレン製袋が熔融する温度とはならなかったが、 させる。
- ・ 燃料集合体の燃料有効長内の のみを考慮する。
- ・ 燃料有効長を実際より長い mm とする。
- ・ 落下試験の結果、クラムシェルは所定の位置から移動することはなかったが、 させる。
- ・ は考慮せず、浸水を考慮する領域とし、他の浸水を考慮する領域と同様に安全側となる水密度とする。
- ・ 耐火試験の結果、減速材ブロックの重量減は確認されなかったが、減速材ブロックの密度を 低下させる
- ・ のみ考慮し、その他の構造物は考慮しない。
- ・ 中性子吸収材中の ^{10}B 密度を最小値からさらに %減じる。

上記の項目のうち、中性子実効増倍率への影響が最も大きいのは「 」である。特別の試験条件下における配列条件を用い、表(ロ)E-1及び表(ロ)E-8に示す特別の試験条件下における評価条件を用いて計算したところ、「 」により、中性子実効増倍率が 以上大きくなることが確認できている((ロ)E 付属資料 1(6.ポリエチレン製袋のモデル化(特別の試験条件下における配列系)参照)。仮にこの影響をみない場合、中性子実効増倍率は 以下となる。

E.4.2 輸送物への水の浸入等

評価においては、輸送物の試験条件にかかわらず、輸送容器内に水が浸入するものとしている。一般の試験条件下においては被覆管を密封境界とし、特別の試験条件下においては被覆管内まで水が浸入するものとしている。

その他の核的安全に与える影響について以下に示す。

(1) 体系の水密度依存性（水の侵入の影響）

詳細を「(ロ)E 付属資料 1(1.体系の水密度依存性)」に示す。

(2) 一般及び特別の試験条件下における配列系の中性子実効増倍率の差異

一般の試験条件下における配列系と特別の試験条件下における配列系の配列数は異なるが、表(ロ)E-1 に示すモデル化の違いから、特別の試験条件下における配列系の方が中性子実効増倍率は最大となる。詳細を「(ロ)E 付属資料 1(2.一般及び特別の試験条件下における配列系の中性子実効増倍率の差異)」に示す。

(3) 収納物の影響

特別の試験条件下における配列系において収納物ごとにその影響を確認した結果、17×17 型タイプ 57 を収納物とした場合に、中性子実効増倍率は最大となる。詳細を「(ロ)E 付属資料 1(3.収納物の影響)」に示す。

(4) 収納物の再配列の影響

収納物の再配列については、中性子相互作用を増大させるよう表(ロ)E-10 に示すモデル化を行った。

表(ロ)E-10 収納物の再配列に関するモデル化

再配列の項目		モデル化方法	モデル化の根拠
径方向	クラムシェル内の 燃料集合体		
	クラムシェル		
	輸送容器		
軸方向	クラムシェル内の 燃料集合体		

E.4.3 計算方法

本評価に使用したコードは KENO-VI (参考文献(1)) である。


KENO-VI (参考文献(1)) は、米国オークリッジ国立研究所で開発された多群モンテカルロコードであり、複雑な 3 次元幾何形状を正確に扱える利点を持ち、体系の中性子実効増倍率の計算を行う臨界計算コードである。

また、本評価に使用した微視的断面積は、ENDF-B/VII をマスタライブラリとする 238 群ライブラリ (参考文献(2)) である。

E.4.4 計算結果

「(ロ)E.4.2」において確認したように、特別の試験条件下における輸送物の配列系 (図(ロ)E-2) の収納物を 17×17 型タイプ 57 とした場合において中性子実効増倍率は最大となり、その評価結果を表(ロ)E-11 に示す。

表(ロ)E-11 中性子実効増倍率の評価結果

17×17 型 タイプ 57


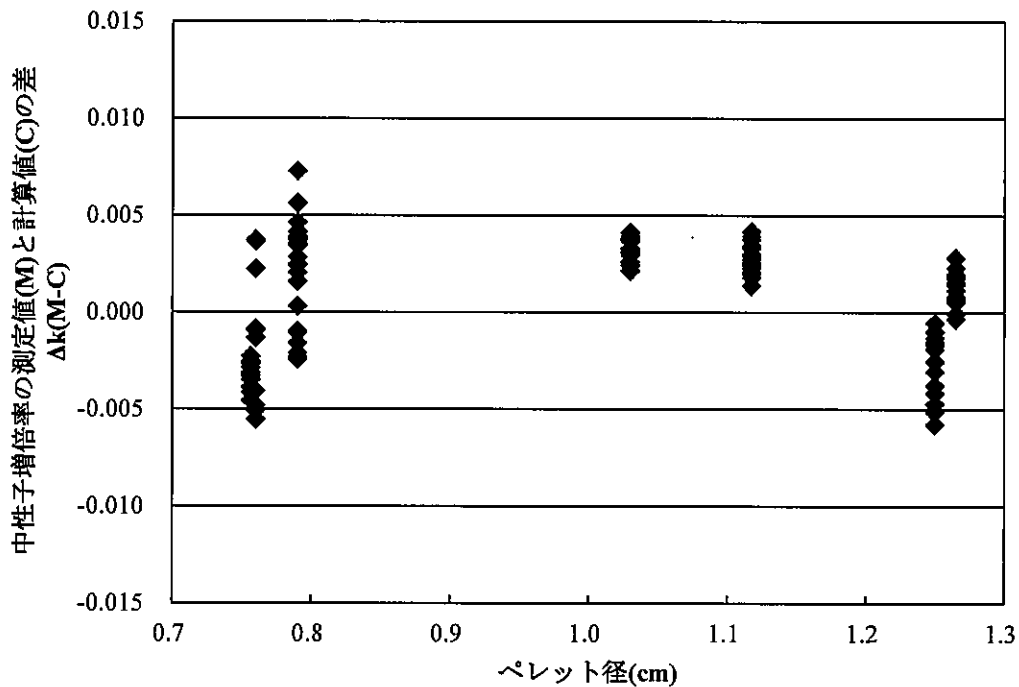
(注) 上段は平均値。下段はモンテカルロ計算における統計上の標準偏差 σ の 3 倍を加えた値。

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 (参考文献(4))。

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、HEU-MET-FAST: 高濃縮-金属-高速中性子スペクトル) から 132 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。計算結果を図(ロ)E-3 に示す。また、図(ロ)E-3 に示した 132 ケースの計算結果に対する統計処理結果を表(ロ)E-12 に示す。

表(ロ)E-12 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。



図(ロ)E-3 ベンチマーク実験解析結果

表(ロ)E-12 ベンチマーク実験解析結果のまとめ

ケース数	132
平均誤差 ($\Delta k (M-C)$ の平均値)	-0.00030
標準偏差 (σ)	0.00329
信頼係数 (f: 99%信頼度・99%確率)	2.772
推定臨界下限増倍率 ($1 - \Delta k - f\sigma$) (平均誤差が負の場合は平均誤差を 0 とする)	0.9908
制限値	0.95

E.6 結果の要約及びその評価

Traveller XL 型輸送物の一般及び特別の試験条件下における未臨界評価を実施した。

この結果、表(□)E- 11 に示すように、統計上の偏差を考慮した中性子実効増倍率の最大値は となった。この値は制限値の 0.95 未満であり、臨界安全上問題ないことを確認した。

参考文献

- (1) Hollenbach, D. F., L. M. Petrie, and N. F. Landers. "KENO-VI: a general quadratic version of the KENO program." Sect. F17 of SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations, ORNL/TM-2005/39, Version 5 (1995).
- (2) Bowman, S. M., et al. "Scale Cross Section Libraries." ORNL/TM-2005/39 Version 5 (2006).
- (3) H. R. Dyer, C. V. Parks., " Recommendations for Preparing the Criticality Safety Evaluation of Transportation Packages", NUREG/CR-5661, ORNL/TM-11936, Oak Ridge National Laboratory, 1997
- (4) International Criticality Safety Benchmark Evaluation, September 2013 Edition, OECD/NEA

付属資料

1) (ロ)E 付属資料 1 サーベイ計算の結果

(ロ)E 付属資料 1

サーベイ計算の結果

1. 体系の水密度依存性（水の侵入の影響）

■評価内容

体系の水密度依存性（水の侵入の影響）を確認するため、特別の試験条件下における配列系（収納物は17×17型タイプ57）を用いて、中性子実効増倍率への影響評価を行った。

この際、体系の水密度依存性（水の侵入の影響）については、収納物自体への水の侵入と収納物間の中性子相互作用のバランスにより決まると考えられることから、水の存在領域を以下の4ケースと設定し、ケースごとに水密度を変化させ、評価を行った。なお、輸送物の配列条件として、表(ロ)E-2に示す特別の試験条件下における配列条件を用い、収納物の評価条件として、表(ロ)E-1及び表(ロ)E-8に示す特別の試験条件下における評価条件を用いた。

- ①
- ②
- ③
- ④

--

■評価結果

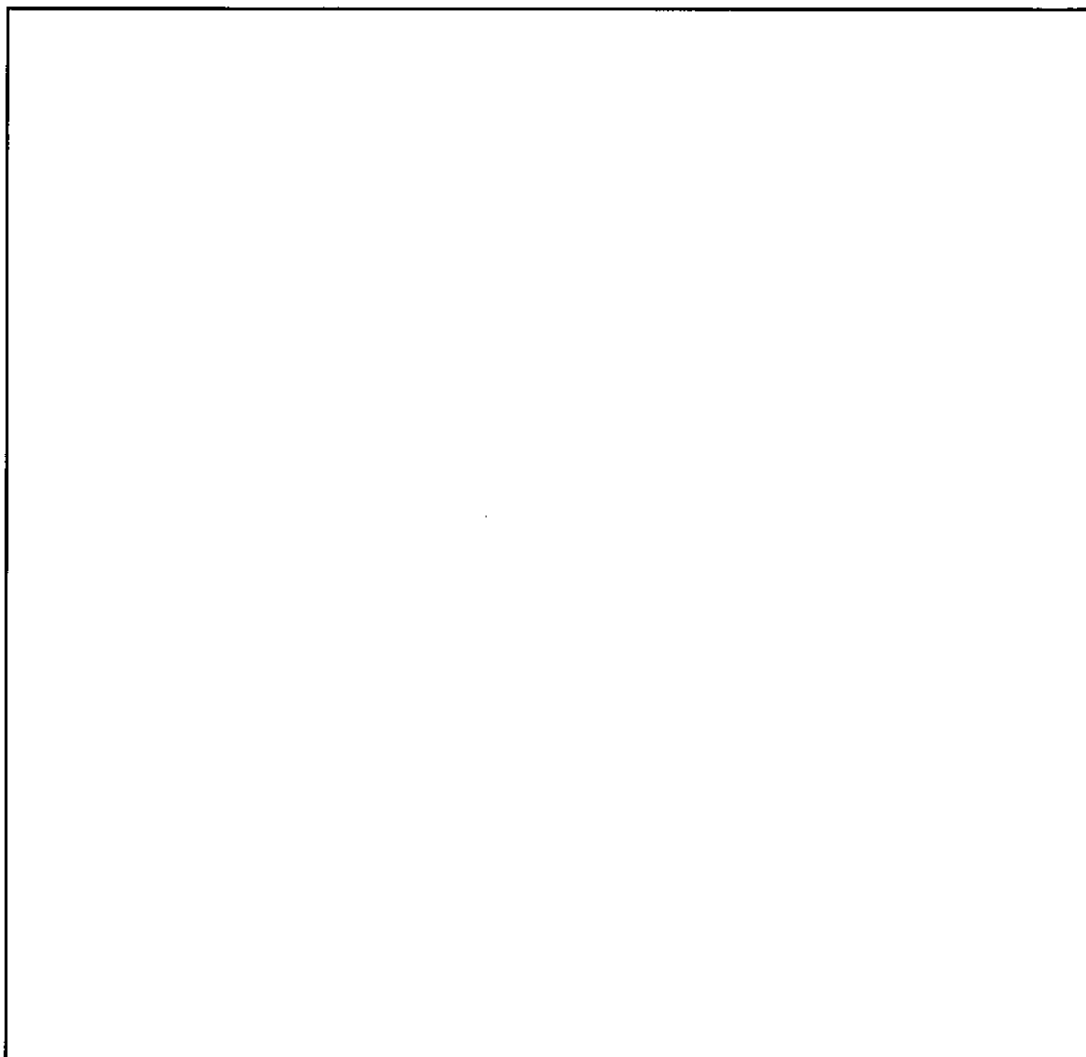
図(ロ)E付1-1に示す結果より、以下のことを確認した。

--

■まとめ

本輸送物の未臨界評価においては、以下の条件を安全側な評価モデルとして採用することとした。

--



図(ロ)E 付 1-1 体系の水密度依存性 (水の侵入の影響)

2. 一般及び特別の試験条件下における配列系の中性子実効増倍率の差異

■評価内容

一般及び特別の試験条件下における配列系のどちらが安全側な評価モデルとなるかを確認するため、それぞれの試験条件下における配列系の中性子実効増倍率の比較評価を行った。

この際、中性子実効増倍率が最大となるよう収納物は 17×17 型タイプ 57、

評価を行った。なお、輸送物の配列条件として、表(ロ)E-2 に示す一般及び特別の試験条件下における配列条件を用い、収納物の評価条件として、表(ロ)E-1 及び表(ロ)E-8 に示す一般及び特別の試験条件下における評価条件を用いた。

■評価結果

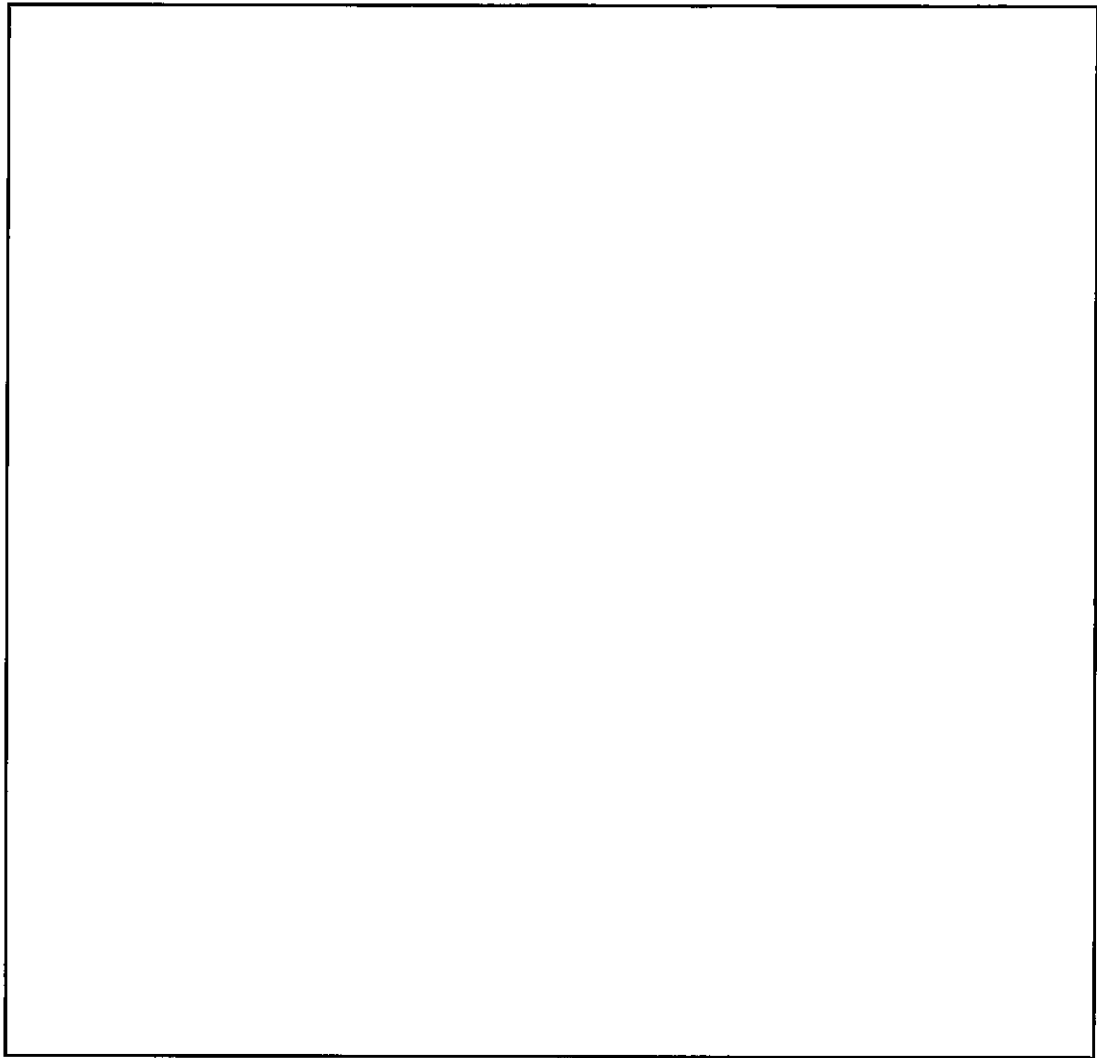
図(ロ)E 付 1-2 に示す結果より、以下のことを確認した。

- ・ 中性子実効増倍率の最大値は、特別の試験条件下における配列系の方が大きくなる。

■まとめ

本輸送物の未臨界評価においては、以下のケースを安全側な評価モデルとして採用することとした。

特別の試験条件下における配列系



図(ロ)E 付 1-2 一般及び特別の試験条件下における配列系の影響

3. 収納物の影響

■評価内容

収納物の影響を確認するため、対象とした収納物ごとの中性子実効増倍率の評価を行った。

この際、中性子実効増倍率が最大となるよう特別の試験条件下における配列系、体系の

なお、輸送物の配列条件として、表(ロ)E-2に示す特別の試験条件下における配列条件を用い、収納物の評価条件として、表(ロ)E-1及び表(ロ)E-5から表(ロ)E-8に示す特別の試験条件下における評価条件を用いた。

■評価結果

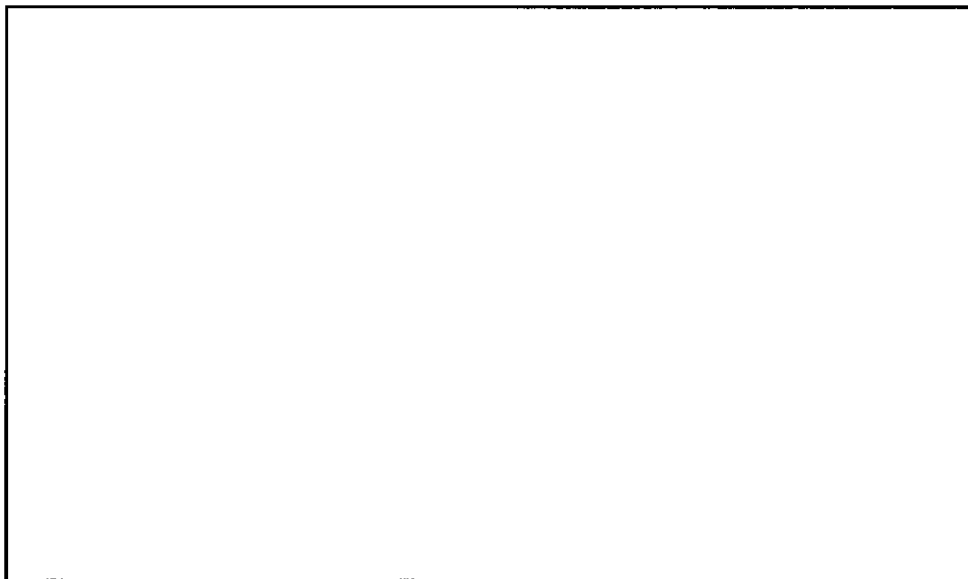
図(ロ)E付1-3に示す結果より、以下のことを確認した。

- ・ 中性子実効増倍率は、収納物を17×17型タイプ57とした場合に最大となる。

■まとめ

本輸送物の未臨界評価においては、以下の収納物を安全側な評価モデルとして採用することとした。

17×17型タイプ57



図(ロ)E付1-3 収納物の影響

4. 特別の試験条件下における燃料棒ピッチのモデル化の検討

■評価内容

特別の試験条件下における配列系では、燃料棒ピッチがノミナル値より拡張する領域（拡張領域）が生じることが試験結果より示唆されているが、

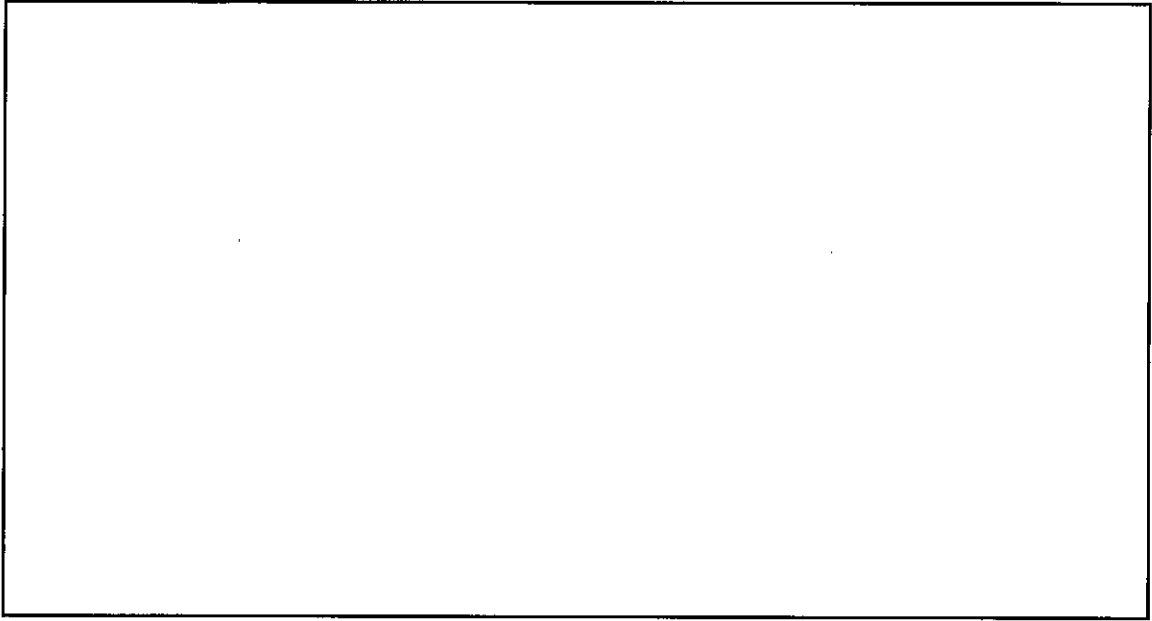
輸送物の配列条件として、表(ロ)E-2 に示す特別の試験条件下における配列条件を用い、拡張領域の燃料棒ピッチ以外の収納物の評価条件として、表(ロ)E-1 及び表(ロ)E-8 に示す特別の試験条件下における評価条件を用いた。

■評価結果

図(ロ)E 付 1-4 に示す結果より、以下のことを確認した。

■まとめ

本輸送物の未臨界評価においては、以下の拡張領域の燃料棒ピッチを安全側な評価モデルとして採用することとした。



図(ロ)E 付 1-4 拡張領域の燃料棒ピッチの影響

5. ポリエチレン製袋のモデル化（一般の試験条件下における配列系）

■評価内容

ポリエチレン製袋（以下、ポリエチレンとする。）は しているが、

中性子実効増倍率に与える影響が異なると考えられる。

そこで、一般の試験条件下における配列系（収納物は 17×17 型タイプ 57）を用い、

による中性子実効増倍率への影響評価を行った。

この際、中性子実効増倍率が最大となるよう体系の水の存在領域は

評価を行った。なお、輸送物の配列条件として、表

(ロ)E-2 に示す一般の試験条件下における配列条件を用い、ポリエチレン以外の収納物の評価条件とし

て、表(ロ)E-1 及び表(ロ)E-8 に示す一般の試験条件下における評価条件を用いた。

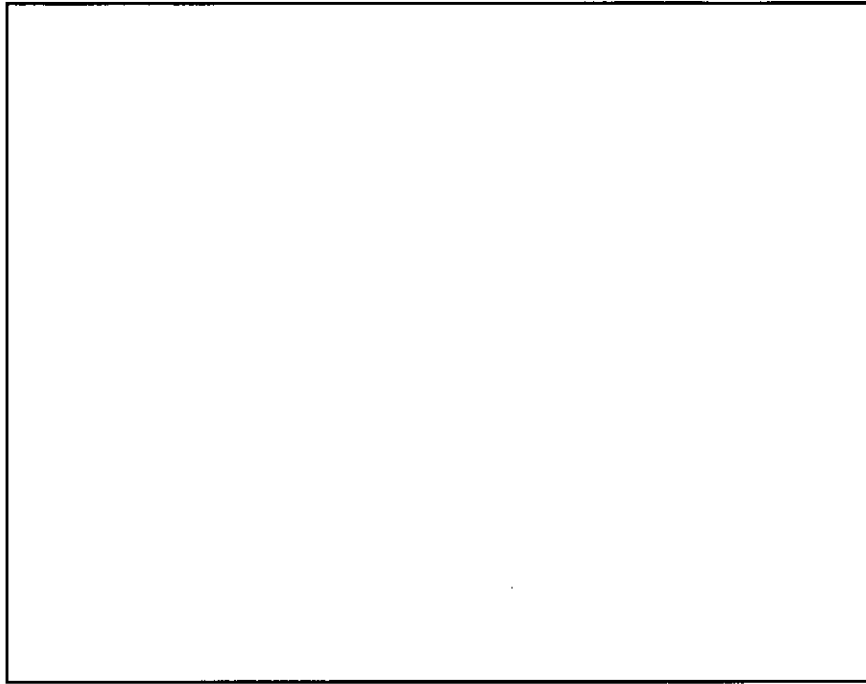
- ①
- ②
- ③
- ④

■評価結果

図(ロ)E 付 1-5 に示す結果より、以下のことを確認した。

■まとめ

本輸送物の一般の試験条件下における配列系の未臨界評価においては、ポリエチレンについて以下の設定を安全側な評価モデルとして採用することとした。



図(ロ)E 付 1・5 一般の試験条件下におけるポリエチレン製袋のモデル化の影響

6. ポリエチレン製袋のモデル化（特別の試験条件下における配列系）

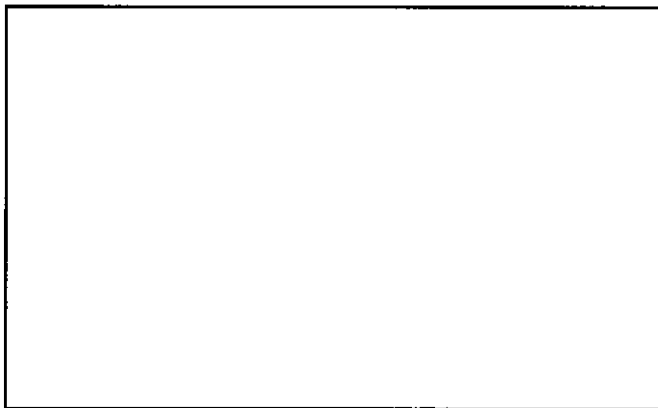
■評価内容

一般の試験条件下における配列系のポリエチレン製袋（以下、ポリエチレンとする。）のモデル化の結果より、確認できた。そこで、同様に特別の試験条件下における配列系（収納物は 17×17 型タイプ 57）においても、の違い（以下の 7 ケース）による中性子実効増倍率への影響評価を行った。

この際、中性子実効増倍率が最大となるよう

と設定して評価を行った。なお、輸送物の配列条件として、表(ロ)E- 2 に示す特別の試験条件下における配列条件を用い、ポリエチレン以外の収納物の評価条件として、表(ロ)E- 1 及び表(ロ)E- 8 に示す特別の試験条件下における評価条件を用いた。

- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤
- ⑥
- ⑦



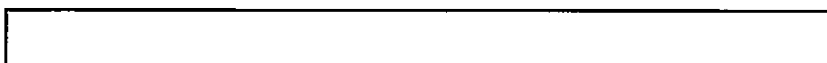
■評価結果

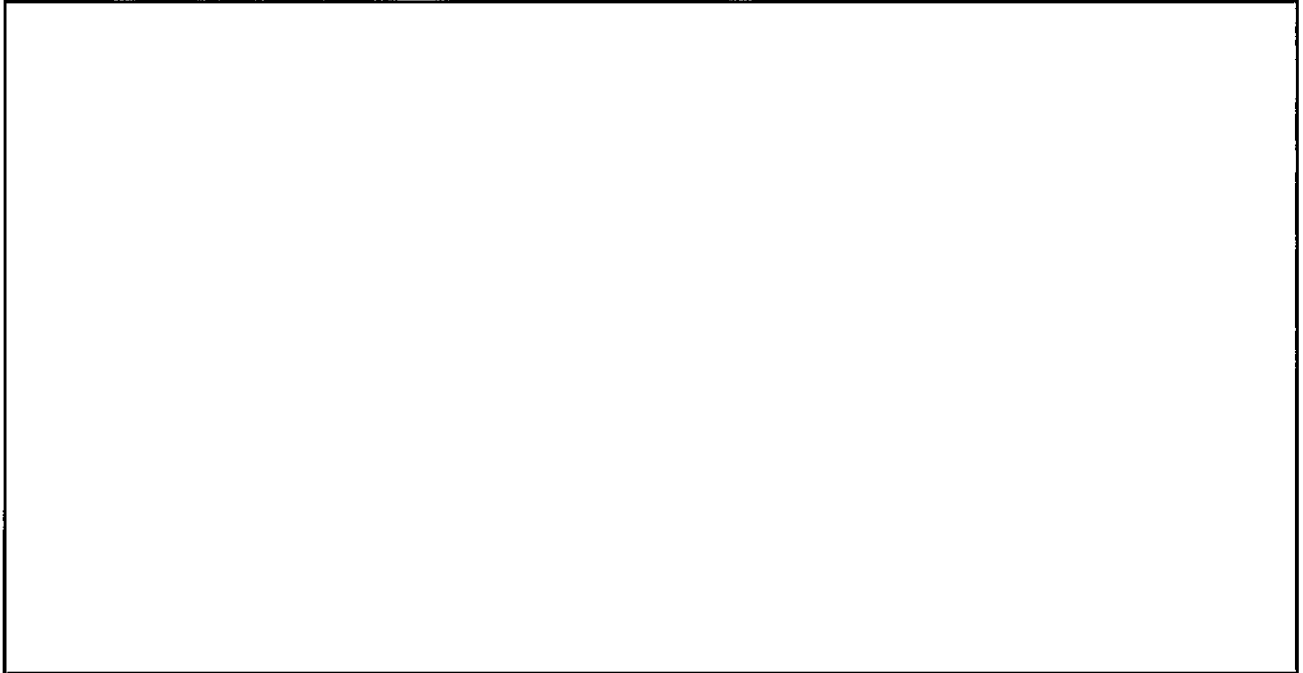
図(ロ)E 付 1- 6 に示す結果より、以下のことを確認した。



■まとめ

本輸送物の特別の試験条件下における配列系の未臨界評価においては、ポリエチレンについて以下の設定を安全側な評価モデルとして採用することとした。





図(ロ)E 付 1-6 特別の試験条件下におけるポリエチレン製袋のモデル化の影響

(ロ)・F 規則及び告示に対する適合性の評価

本輸送物の設計が規則及び告示に定める技術基準に適合していることを各条文ごとに説明する。

外運搬規則の項目	外運搬告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第三条 第一項 第二号	第四条 及び 別表第一	<p>本輸送物に収納される放射性物質は <input type="text"/> %以下の濃縮ウランであり、「特別形核燃料物質等以外のもの」に該当することから、A_2 値は無制限である。</p> <p>以上のことから、当該輸送物は技術基準における A 型輸送物に該当する。</p>	(イ)－D
第四条 第一号		<p>輸送物総重量は <input type="text"/> kg 以下であり、容器には専用の吊り上げ装置(スタッキングブラケット)及びフォークリフトポケットが備えてあり、クレーンやフォークリフト等の機械的手段により容易に取扱うことができる。</p> <p>スタッキングブラケットは取り扱い中に予想される急激な吊上げに対しても耐えるよう輸送物重量の 3 倍の荷重がかかった時でも十分容器の健全性を保つ構造となっている。また、輸送物を積み重ねた場合に対しても耐えるよう輸送物重量の 5 倍の荷重がかかった時でも十分容器の健全性を保つ構造となっている。よって、輸送物は安全に取り扱うことができる。</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。</p>	<p>(イ)－C(1)</p> <p>(イ)－C(6)</p> <p>(ロ)－A.4.4</p> <p>(ロ)－A.5.4</p>
第二号		<p>・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°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 <input type="text"/> $^{\circ}\text{C}$ である。</p> <p>・運搬中に予想される周囲温度の変化によって、輸送容器各部及び収納物の温度が変化しても、外容器の主要の構造材はステンレス鋼からなり、クラムシエルの主要構造材はアルミニウム合金からなるが、ステンレス鋼とクラムシエルの接続はゴム製のショックマウントからなるため、熱膨張差は影響しない。燃料集合体を一般の試験条件下における最高温度 <input type="text"/> $^{\circ}\text{C}$ で装荷し、最低温度 -40°C で輸送する場合、クラムシエルと燃料集合体間の熱膨張差は <input type="text"/> mm であるが、燃料集合体と接触しているゴム部材によって熱膨張差は吸収される。このため熱膨張による顕著な応力は発生しない。</p> <p>・輸送容器自体は密封構造となっておらず、容器内の圧力の変動は発生しない。また、密封溶接時の温度を保守的に考えた 0°C から一般の試験条件下における最高温度 <input type="text"/> $^{\circ}\text{C}$ まで温度変化し、周囲の圧力が 60kPa まで低下したことによる燃料棒の最大内外圧差は <input type="text"/> Pa であるが、燃料棒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。</p> <p>・輸送物は運搬中、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物の健全性は確保される構造となっている。また、輸送物の固有振動数と車両から受ける励振力の周波数域は大きな開きがあり、応答増幅の影響を考慮しても輸送物の構造健全性は確保され亀裂、破損を生じるおそれはない。</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。</p>	<p>(ロ)－B.4.2</p> <p>(ロ)－B.4.3</p> <p>(ロ)－A.5.1.2</p> <p>(ロ)－A.4.6</p> <p>(ロ)－B.4.4</p> <p>(ロ)－A.4.7</p>
第三号		<p>輸送物の外面の突起物はフォークリフトポケット、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脚のみであり、なめらかな表面であるステンレス鋼板で覆われているため除染は容易である。</p> <p>以上のことから、当該輸送物は規則に定める技術基準に適合する。</p>	(イ)－C(11)

外運搬規則の項目	外運搬告示の項目	説明	申請書記載対応項目
第四号		<p>以下の通り、輸送物の構成部品の材料相互及び収納物との接触に伴う危険な物理的作用又は化学反応を生じるおそれはない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・収納物である燃料集合体はゴム製部材を介して構成部品と接触しており、輸送容器と燃料集合体の熱膨張差を吸収し、輸送容器構成部品相互で熱膨張による干渉は生じない設計であることから、接触に伴う物理的作用を生じるおそれはない。 ・輸送容器の構成部品はステンレス鋼、アルミニウム合金等化学的に安定した材料を使用していることから、腐食等化学反応を生じるおそれはない。 ・中性子減速材に使用する超高分子量ポリエチレン及びショックマウントの材料である天然ゴムは金属材料と化学反応を起こすおそれはない。 <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。</p>	<p>(ロ)－A.5.1.2</p> <p>(ロ)－A.4.1</p>
第五号		<p>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)
第八号	第九条	<p>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：4 Bq/cm²) を超えないことを確認することになっている。</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。</p>	(ハ)－A.2
第十号		<p>輸送容器には収納物及び梱包材以外は収納されないよう確認することになっている。</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。</p>	(ハ)－A.2
第五条 第二号		<p>輸送物の外寸法は、次の通り 10 cm 以上である。(単位：mm)</p> <p>(長さ) (巾) (高さ) 5,740 × 688 × 998</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。</p>	(イ)－C(6)
第三号		<p>輸送容器の下側ケースと上側ケースはヒンジ及びボルトにより固定されており、簡単には開封されない。また封印が取り付けられており、開封された場合にはそれがわかるようになっている。</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。</p>	<p>(イ)－C(6)(a)</p> <p>(ハ)－A.1</p>
第四号		<p>本輸送物における運転中に予想される温度範囲は-40℃～□℃である。</p> <p>構成部品に使用する材料(ステンレス鋼、アルミニウム合金)及び輸送容器の密封境界であるジルカロイ-4及びジルコニウム合金被覆管は、運搬中に予想される温度範囲(-40℃から□℃)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ため、亀裂・破損が生じるおそれはない。</p> <p>以上のことから、当該輸送物は規則に定める技術基準に適合する。</p>	<p>(ロ)－B.4.6</p> <p>(ロ)－A.4.2.1</p> <p>(ロ)－A.4.2.3</p> <p>(ロ)－A.3</p>
第五号		<p>構造解析により求めた周囲の圧力が絶対圧で□kPaまで低下した場合の被覆管の最大内外圧差は□Pa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、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、当該輸送物は規則に定める技術基準に適合する。</p>	(ロ)－A.4.6

外運搬規則 の項目	外運搬告示 の項目	説 明	申請書記載 対応項目
(ロ)	第十三条 及び 別記第三	<p>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。</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。</p> <p>ウラン量の最も多い17×17型タイプ57の燃料集合体を収納し、線源強度が最も高くなるウラン同位体条件及び一般の試験条件下における寸法変更として保守的に外容器外板が径方向に□mm圧縮変形するものとした上で QAD-CGGP2R コードによる遮蔽解析を実施したところ、輸送物の表面の線量当量率は最大でも□mSv/h以下で、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□%とわずかである。</p>	(ロ)-D.1
第十一条	第二十三条	<p>本輸送物は、15 g以上のウラン235を輸送する。</p> <p>以上のことから、本輸送物は技術基準における核分裂性輸送物に該当する。</p>	(イ)-D
第一号 (イ)	第二十四条 及び 別記第十一	<p>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。</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。</p> <p>別記第三の第一条 (イ)</p> <p>外運搬規則第九号(イ)に示したように、水噴霧による輸送物内外部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のおそれはない。</p> <p>別記第三の第一条 (ロ) (1)</p> <p>外運搬規則第九号(イ)に示したように、原型容器に対する落下高さ1.2mの自由落下試験において、輸送容器の変形は外容器に限られ、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かった。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が生じるおそれはない。</p> <p>別記第三の第一条 (ロ) (3)</p> <p>外運搬規則第九号(イ)に示したように、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が生じるおそれはない。</p> <p>別記第三の第一条 (ロ) (4)</p> <p>外運搬規則第九号(イ)に示したように、容器に対して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が生じるおそれはない。</p>	(ロ)-A.9.1.4

外運搬規則 の項目	外運搬告示 の項目	説 明	申請書記載 対応項目
(ロ)	第二十四条 及び 別記第十一	<p>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、当該輸送物は規則に定める技術基準に適合する。</p> <p>別記第三の第一条 (イ) 外運搬規則第九号(イ)に示したように、水噴霧による輸送物内外部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>別記第三の第一条 (ロ) (1) 外運搬規則第九号(イ)に示したように、原型容器に対する落下高さ 1.2m の自由落下試験において、輸送容器の変形は外容器に限られ、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>別記第三の第一条 (ロ) (3) 外運搬規則第九号(イ)に示したように、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>別記第三の第一条 (ロ) (4) 外運搬規則第九号(イ)に示したように、容器に対して 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>	(ロ)-A.9.1.4
第二号 (イ)~(ホ)	第二十四条 第二十五条 第二十六条 第二十七条 及び 別記第十二	<p>孤立系の評価は、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。</p> <p>配列系の評価は、一般の試験条件下においては輸送制限個数の 5 倍、特別の試験条件下においては輸送制限個数の 2 倍を配列し、中性子実効増倍率の差異を確認したところ、特別の試験条件下における配列系において中性子実効増倍率は最大となった。</p> <p>最も中性子増倍率が大きくなるケースとして、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件に置いた輸送物として、落下試験によって得られた外容器の変形量、燃料棒ピッチの拡張等を保守的に考慮し、配列系の条件として輸送制限個数の 2 倍を超える個数を配列し、KENO-VI コードで解析を実施した結果、実効増倍係数は標準偏差の三倍を考慮して最大でも <input type="text"/> である。実効増倍係数は 0.95 未満であり、臨界に達しないことから、規則に定める技術上の基準に適合する。</p>	(ロ)-E.3.1 (ロ)-E.4.2 (ロ)E 付属資料 1, 2. (ロ)-E.4.4
第三号		<p>外運搬規則第五条第四号における説明で述べたように、-40~<input type="text"/>°C の温度範囲において、亀裂、破損等を生じない。 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。</p>	(ロ)-B.4.6 (ロ)-A.4.2.1 (ロ)-A.4.2.3 (ロ)-A.3

(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 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)A-1に示す。

A.1 装荷方法

A.1.1 燃料装荷

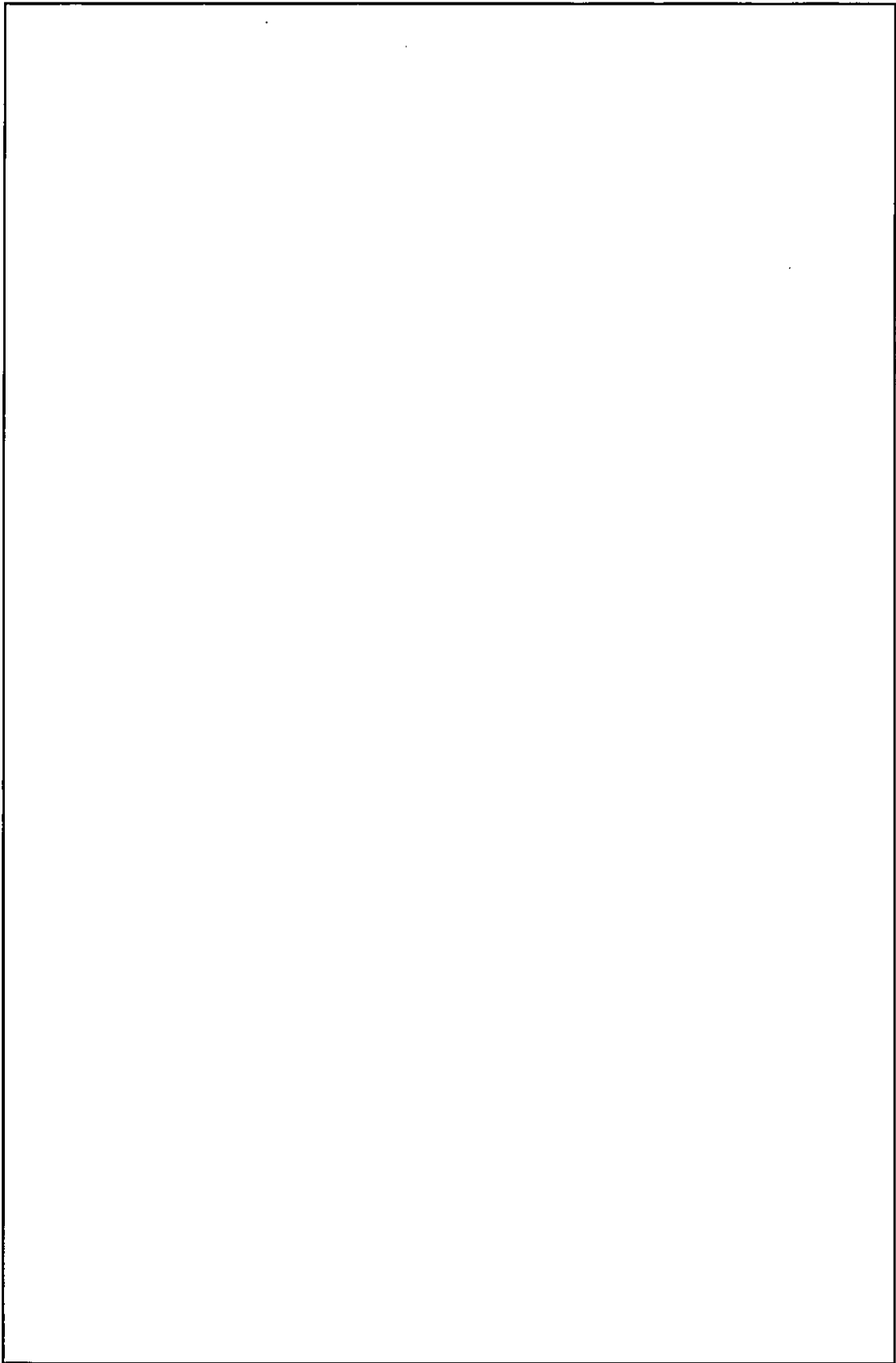
燃料集合体の装荷は、下記の手順例に従って実施する。各手順ごとに検査、試験及び特別な準備事項を記述する。ただし、必要に応じ手順を変更することがある。

No.	作 業 内 容	備 考
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

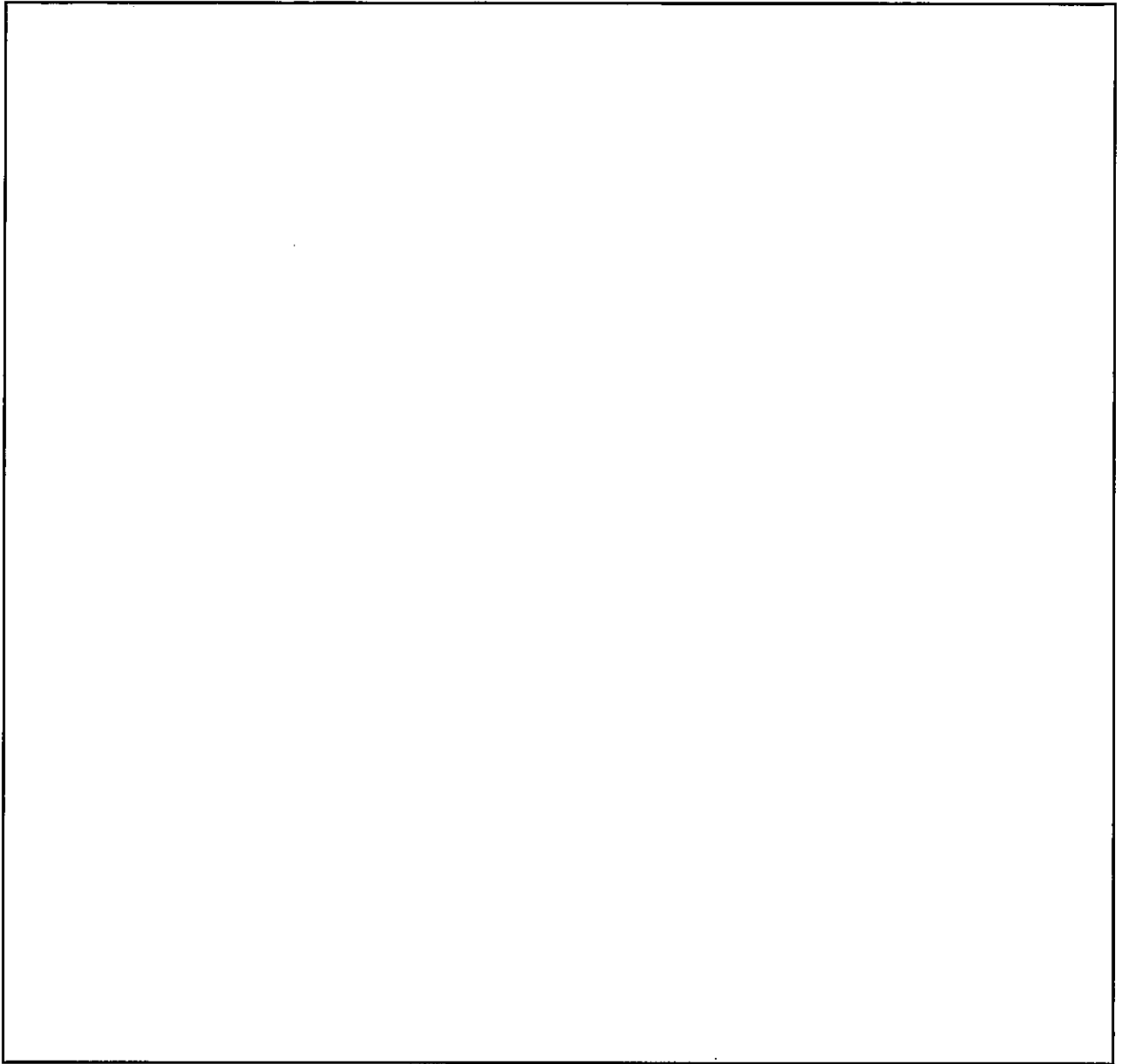
No.	作 業 内 容	備 考
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		

No.	作 業 内 容	備 考
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		

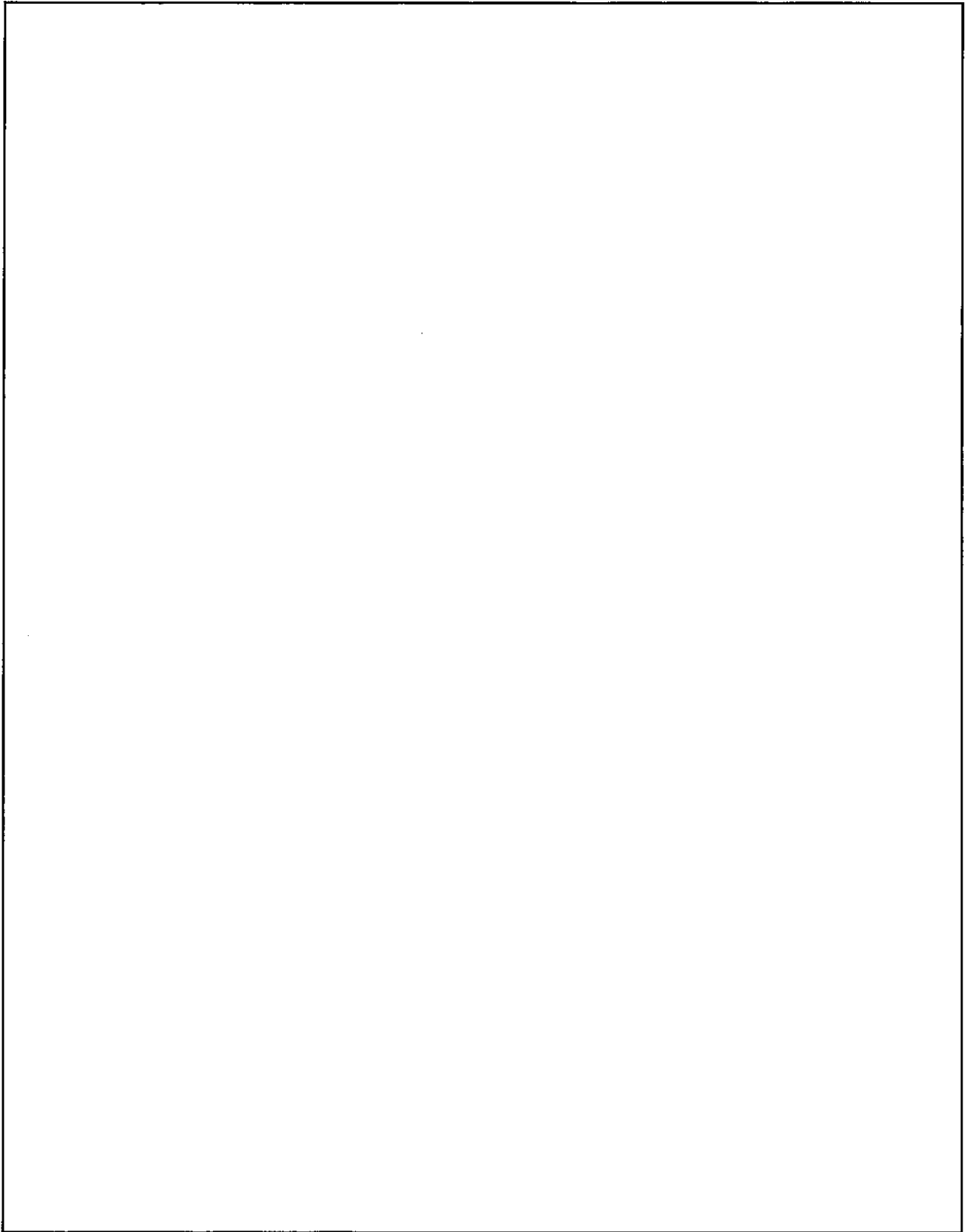
No.	作 業 内 容	備 考
31		
27		
28		
29		
30		
30		
31		



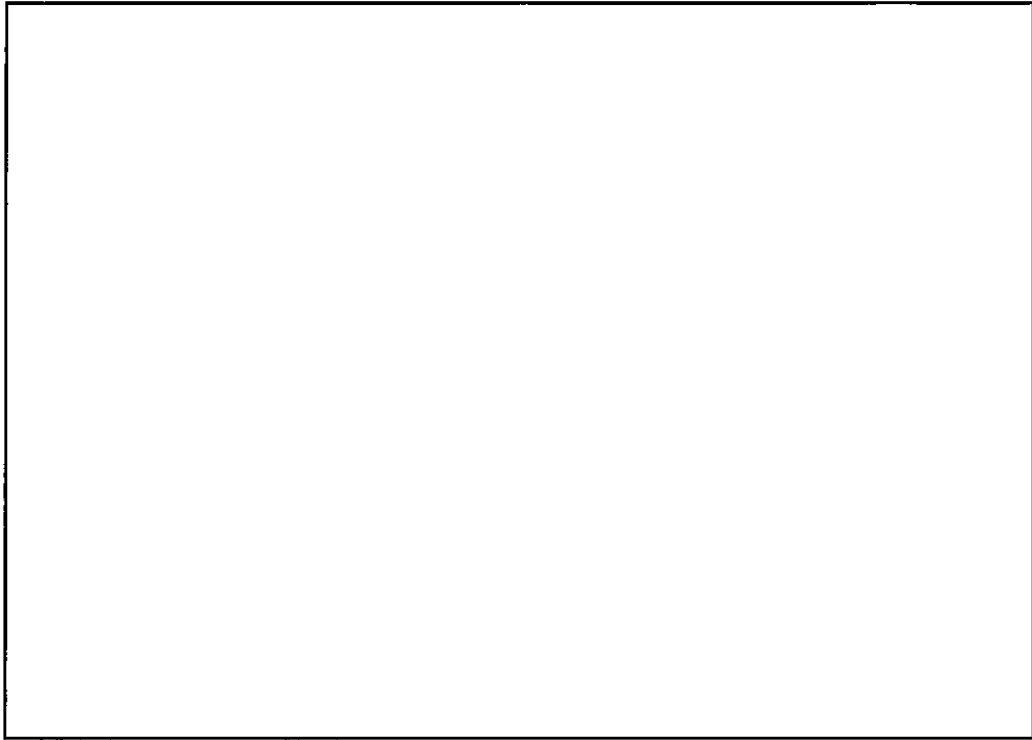
図(ハ)A-1 輸送物の取扱いフロー例



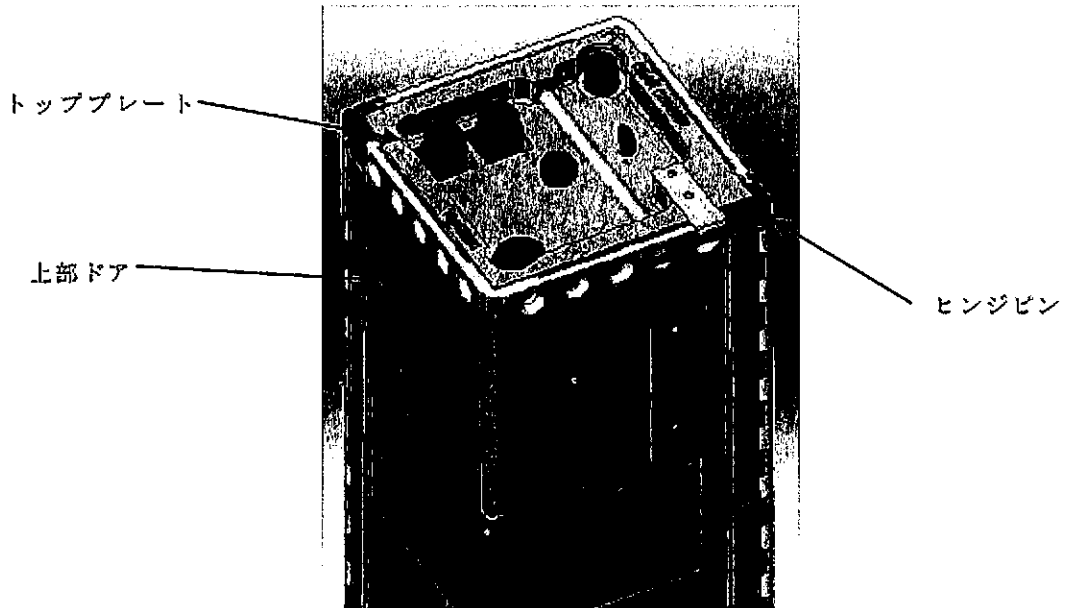
図(ハ)A-3 Traveller XL の Upender への設置



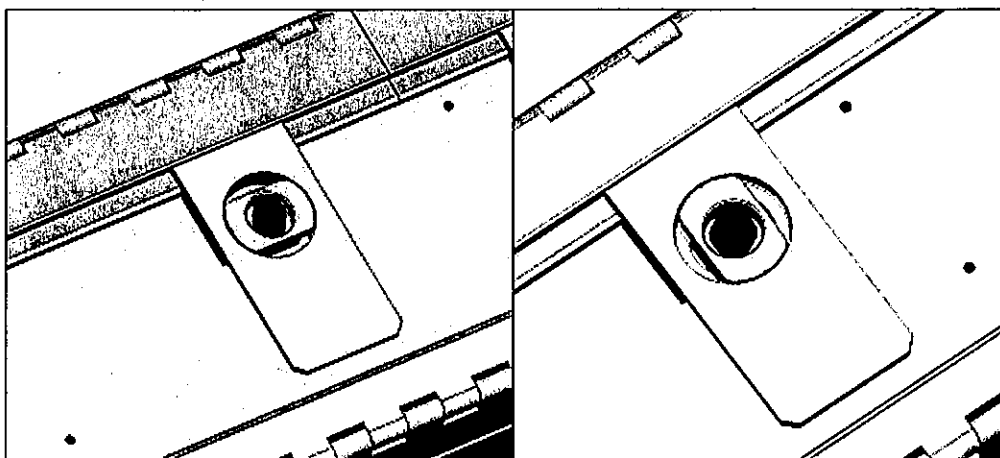
図(ハ)A-5 デュアルローリフトアダプターへのスプレッダープレートの取り付け



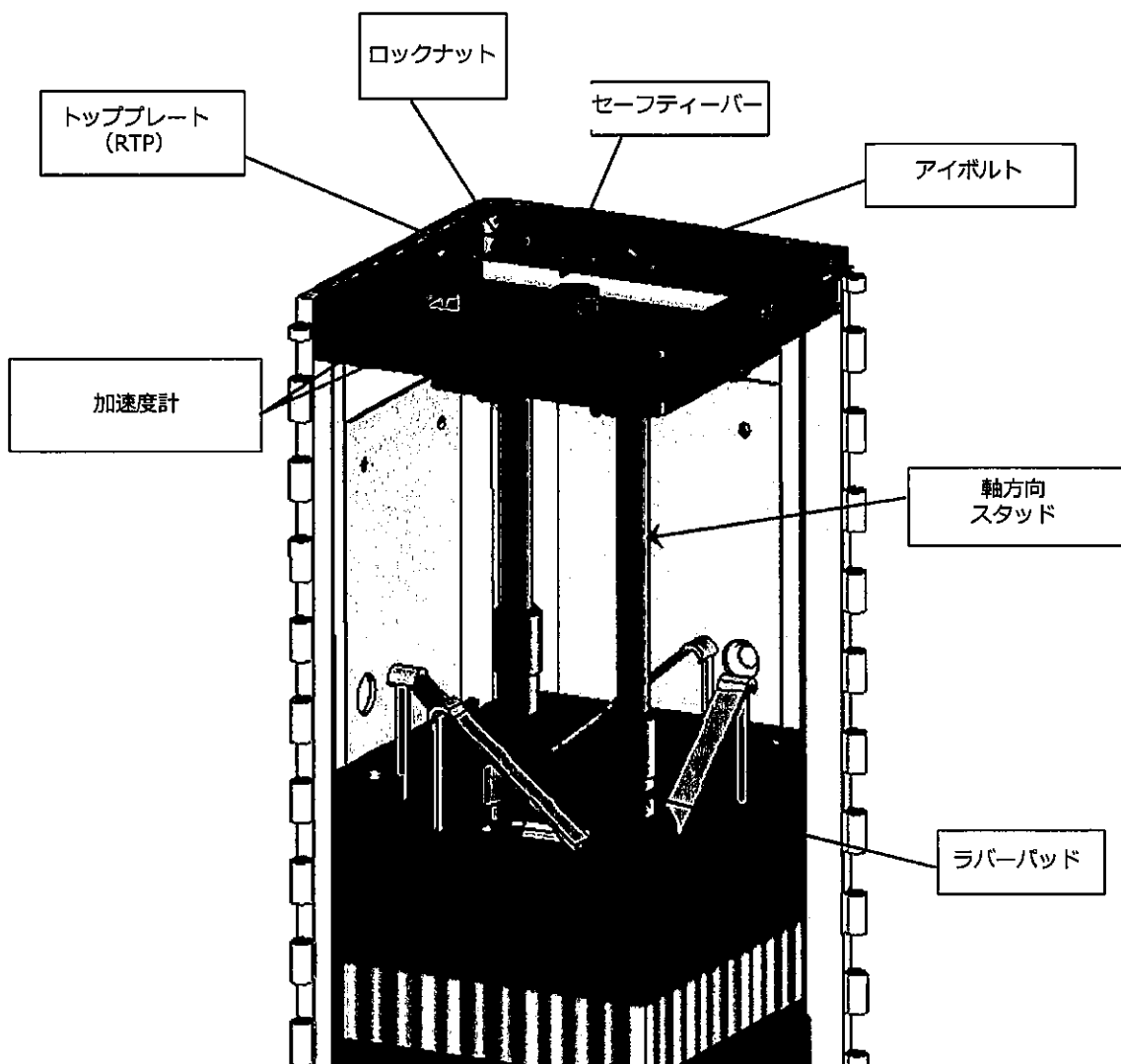
図(ハ)A-6 カバーラッチ



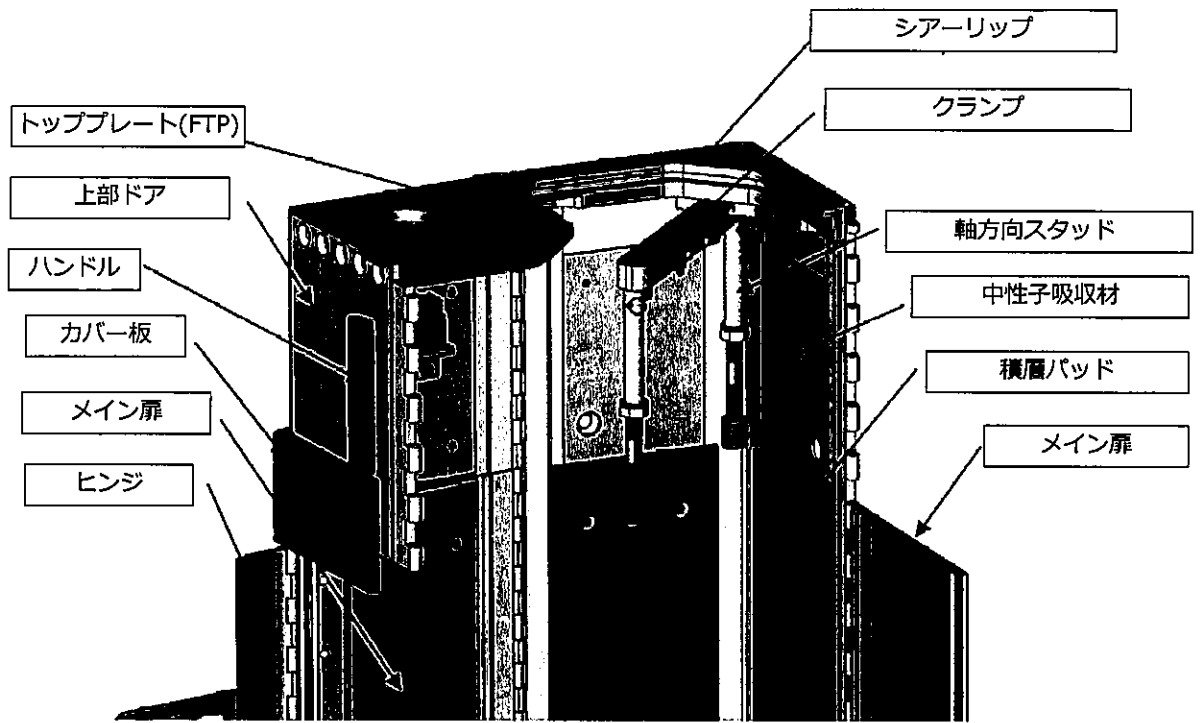
図(ハ)A-7 クラムシエルの上端部



図(ハ)A-8 クラムシエルのラッチ機構 (左：ロック状態、右：アンロック状態)



図(ハ)A-9 トッププレート (RTP)



図(ハ)A-10 トッププレート (FTP)

A.1.2 輸送物の取扱い

輸送容器に燃料集合体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いずれかとする。

(1) フォークリフトによる移動

輸送容器底部のフォークリフトポケット（図(イ)-1 参照）にフォークリフトの爪を差込み取扱う。

(2) クレーンによる移動

輸送容器上側ケースのスタッキングブラケットに設けられた吊り孔に対して、シャックル等を介して、スリング、チェーン等を用いて吊上げ移動を行う。

(3) パレットトラックによる移動

前後方向から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。

A.2 核燃料輸送物の発送前検査

輸送物の発送の都度、表(ハ)A-1に示す輸送物発送前検査を実施する。

表(ハ)A-1 輸送物発送前検査

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. 種類：軽水炉用新燃料集合体 2. 濃縮度 \square wt%以下 3. 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 4. 収納量： 性状：固体 数量：燃料集合体 1 体 集合体重量： \square kg 以下 UO_2 重量： \square kg 以下 5. 放射能量： \square GBq 以下 6. 外観： 外観：異常がないこと。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。 封印がされていること。
吊上げ検査	核燃料輸送物を吊り上げた後の状態において、吊上装置の外観を目視で検査する。	吊上装置の強度を損なうようなき裂、異常な傷、変形や溶接部の割れがないこと。
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 \square kg 以下
表面密度検査	スミヤ法等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 の位置：100 μ Sv/h 以下
未臨界検査	形状等を目視により検査する。	クラムシエルの形状に著しい変形のないこと。

A.3 取出し方法

燃料集合体の輸送容器からの取り出しは、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	備考
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

No.	作 業 内 容	備 考
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

No.	作 業 内 容	備 考
25		
26		
27		

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する集合体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

輸送容器は定期自主検査を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。定期自主検査要領を表(ハ)B-1に示す。なお、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の定期自主検査要領を表(ハ)B-2に示す。

ボルト・ナット類、ラッチ類等の輸送容器の脱着可能な構成部品は、輸送容器の機能維持や保守整備等の理由により必要があれば随時同一規格品と取替える。

輸送容器の外容器及びクラムシエルは、輸送容器の機能維持や保守整備等の理由により必要があれば随時修理を行う。

B.1 外観検査

定期自主検査ごとに以下の項目について、目視により検査する。

- ・容器の外観（上側ケース、下側ケース、クラムシエル）に輸送容器の機能を損なうような著しい変形や破損等がないこと。
- ・各溶接部の割れがないこと。
- ・ボルト・ナット類の変形や破損もしくは欠落がないこと。

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、外容器内部を除いた部位を対象とする上記検査を実施し、保管が終了し輸送に使用する前に上記の検査を実施する。

B.2 耐圧検査

該当しない。

B.3 気密漏えい検査

該当しない。

B.4 遮蔽検査

該当しない。

B.5 未臨界検査

定期自主検査ごとに以下の項目について、目視により検査する。

- ・外容器及びクラムシエルについて隣接する輸送物との燃料領域間隔が著しく減少するような変形がないこと。

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、当該検査は対象外とし、保管が終了し輸送に使用する前に上記の検査を実施する。

B.6 熱検査

該当しない。

B.7 吊上検査

上側ケース吊部（スタッキングブラケット）の強度を損なうような変形や溶接部の割れがないことを目視により検査する。

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、当該検査は対象外とし、保管が終了し輸送に使用する前に上記の検査を実施する。

B.8 作動確認検査

該当しない。

B.9 補助系の保守

該当しない。

B.10 密封装置の弁、ガスケット等の保守

該当しない。

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。長期保管が終了もしくは保管場所変更等により一時的に保管が中断した場合は、保管中の定期検査の実施間隔にかかわらず、「B.1 外観検査」、「B.5 未臨界検査」及び「B.7 吊上げ検査」の各検査を実施する。

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

特になし。

表(ハ)B-1 定期自主検査要領

検査項目	方 法	基 準
外観検査	<ol style="list-style-type: none"> 1. 容器の外観（上側ケース、下側ケース、クラムシエル）を目視により検査する。 2. 各溶接部を目視により検査する。 3. ボルト・ナット類を目視により検査する。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 輸送容器の機能を損なうような著しい変形や破損等がないこと。 2. 割れがないこと。 3. 変形や破損もしくは欠落がないこと。
未臨界検査	外容器及びクラムシエルの外観を目視により検査する。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 著しい変形や破損等及び所定位置からのズレがないこと。 2. 隣接する輸送物との燃料領域間隔が著しく減少するような変形がないこと。
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。	吊部の強度を損なうような変形や溶接部の割れがないこと。

表(ハ)B-2 長期保管時定期自主検査要領

項 目	方 法	基 準
外観検査	<ol style="list-style-type: none"> 1. 外容器の外表面を目視により検査する。 2. 外容器の外表面の各溶接部を目視により検査する。 3. 外容器のボルト・ナット類を目視により検査する。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 輸送容器の機能を損なうような著しい変形や破損等がないこと。 2. 割れがないこと。 3. 変形や破損もしくは欠落がないこと。

(二)章 安全設計及び安全輸送に関する特記事項

特記事項なし。

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 3 年 2 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、核燃料輸送物設計変更承認申請書（熊原第 20-017 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、以下の通り「輸送容器の製作に係る品質マネジメント指針について」（平成 20 年 6 月 20 日付け平成 20・06・10 原院第 1 号）に準拠した品質マネジメントシステムを当社熊取事業所に確立し、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当社社長より権限移譲された熊取事業所長が担う。（以下、所長と云う。）所長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

所長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-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

所長は、管理責任者に品質保証部長を任命する。品質保証部長は本来の職務とは関係なく、次の事項について責任と権限を有す。

- (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所長へ報告する。

B.3 品質保証部

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 燃料製造部

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) 輸送容器の取扱い・保守の実施
- (7) 核燃料輸送物の輸送の管理

B.5 燃料サイクル技術部

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 炉心・安全技術部

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 環境安全部

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 設備管理部

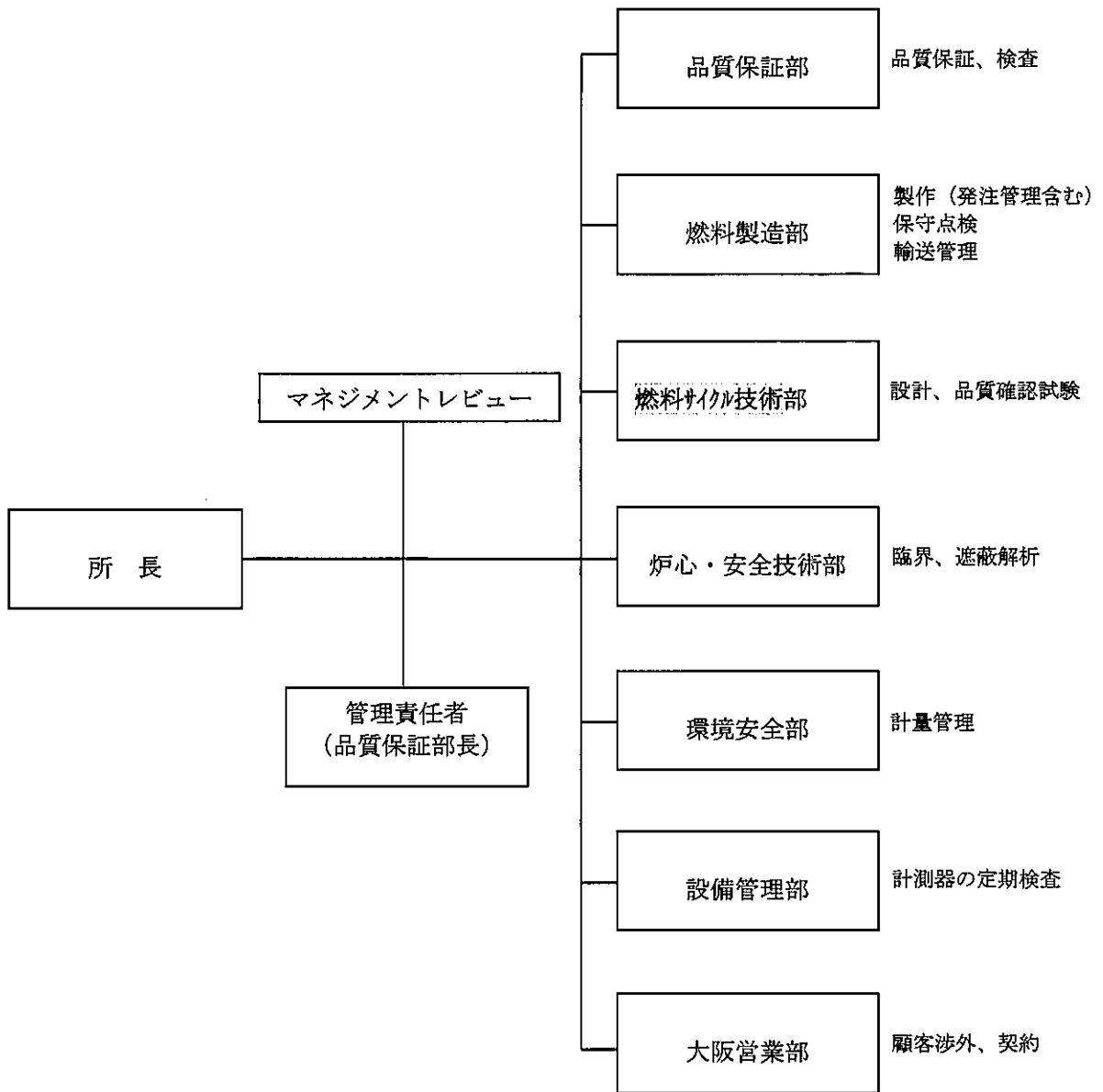
設備管理部長は、次の責任及び権限を有する。

- (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）熊取事業所 輸送容器の設計及び製作に係る組織

(イ)－C 教育・訓練

品質保証部長、燃料製造部長、燃料サイクル技術部長、炉心・安全技術部長、環境安全部長、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、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

E.1 輸送容器を新規に製作する場合

輸送容器を新規に製作する場合、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.1.1 容器製造者の評価

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。評価にあたっては、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.1.2 容器製造者への品質マネジメントシステムの要求事項

燃料製造部長は、輸送容器の製造発注にあたって、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 輸送容器の製造にあたって、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、作業指示や納期等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、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、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) 検査の項目が簡易なものや汎用品であって、受入時の検収で十分と認められる場合。

E.1.3 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) 品質保証部長は、品質監査にあたって、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、燃料製造部長は、輸送容器の検査にあたって、検査計画及び検査要領を策定する。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) 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) 燃料製造部長は、輸送容器の検査にあたって、安全上の重要性等を考慮しつつ、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、立会検査又は記録検査等の検査要領を策定する。

E.2 製作が完了している輸送容器の製造を検証する場合

製作が完了している輸送容器を検証する場合、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に適合することを確実にするため、次の事項を実施する。

- (1) 燃料サイクル技術部長は、容器製造者の製作当時の品質活動状況の記録等により、当該輸送容器が適切な品質活動（ISO 9001 等に適合する品質管理等）のもと製作されたものであることを確認する。
- (2) 燃料サイクル技術部長は、製作が完了している輸送容器の検査記録を元に、安全上の重要性等を考慮しつつ、公的規格の適用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、記録確認を行う。

(イ)‑F 取扱い及び保守

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、以下の通り、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あたり、“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あたり、“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、核燃料輸送物の輸送運用上、当社東海事業所及び他社に委託する場合がある。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

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

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。