

令和 5 年 6 月 13 日  
三菱原子燃料株式会社

MFC-1 型核燃料輸送物 5/25 ヒアのご質問に対する説明

2-1 口章 F.2 の説明に関し、経年変化評価を定量的にとのコメント対応として新規説明された累積中性子照射量（60 年で  $\square$  n/cm<sup>2</sup>）は少ないように思われる。どのような過程にて算出されたか説明すること。また、ホウ素の核的損耗（ $\square$ ）についても、同様に説明のこと。

計算の詳細について別紙 1 に示します。なお、累積中性子照射量計算にあたり、単位換算に誤りがあったため数値を訂正いたします。別紙 2 に示します。

2-2 また 2-1 にかかわり、基準値に対する累積照射量の説明に関して「十分小さく無視しうる」という表現は、数値を比較していることを考えると日本語として不適切に思われる。適切に見直すこと。

「十分小さい。」という表現に見直します。別紙 2 に示します。

2-3 口章 A の構造評価にかかわり、温度変化による内外圧力変動に対する容器（外筒）の疲労評価を実施しているが、一方で密封境界は燃料棒被覆管との説明もある。安全機能の観点から評価の要否を考えて適切に反映のこと。

ご指摘の通り本輸送容器の密封境界は燃料棒被覆管です。安全評価上、容器自体に密封境界としての安全機能は要求していないため本評価は削除します。別紙 2 に示します。

2-4 構造評価の口章 A.10 項は付属書として本文を補足する位置づけであるが、本文とのつながりを明記すること。同様に付属書は本文に読み込むこと。

付属書としている口章 A (A.10) 及び F (F.4.2) について本文、付属書それぞれに引用していることが分かるようにします。別紙 2 に示します。

2-5 口章 F.2 のゴムの経年変化にかかわり熱の要因の説明に関して、「熱劣化は生じないが、熱影響により応力緩和が生じ」との説明であるが。応力緩和は熱劣化の一つで矛盾した説明と考えられる。適切に見直すこと。

劣化は、ゴムのひび割れなどゴムそのものが損傷する状態を示す表現として記載しており応力緩和は劣化とは考えておりません。応力緩和と劣化が混同されるような記載は適切に見直します。別紙 2 に示します。

2-6 ゴムによる経年変化は、安全評価に影響あるのか明確にすること。

ゴムによる経年変化はあるものの安全評価に影響するものではないため、その趣旨で構成及び記載を見直します。ゴムの寿命は交換頻度を 13 年以内と定めております。寿命の範囲内で交換することにより、ゴムの経年変化が安全評価に影響することはありません。別紙 2 に示します。

2-7 口章Fは経年変化の安全解析への考慮の必要性を議論する章であり、各安全解析の章で本検討結果を踏まえた評価を説明するよう構成を適切に見直すこと。

考慮した評価結果までの記載は各安全評価のところ述べており、口章Fでは、経年変化が安全解析に影響しないこととその根拠を記載するようにします。重複して説明しないよう記載を見直します。別紙2に示します。

以 上

MFC-1 型輸送容器の経年変化評価に用いる累積中性子照射量及びボロンの減損率について

## 1. はじめに

MFC-1 型輸送容器の経年変化評価のため、使用予定期間における各部の累積中性子照射量を保守的に算定した。また、算定された中性子照射量に基づき、ボロン入りステンレス鋼に含まれるボロン ( $^{10}\text{B}$ ) の減損率を保守的に算定した。

## 2. 各部の中性子照射量の算定

### (1) 中性子発生量

未照射燃料より生じる中性子は U-238 の自発核分裂によるものが主となるため、燃料集合体 2 体分のウランをすべて U-238 と仮定して中性子発生量  $N$  (n/sec) を算定する。

$$N = m \alpha n$$

ここで、 $m$  : ウラン量 :  (kg)

$\alpha$  : U-238 の自発核分裂確率 : 7 (回/sec·kg)

$n$  : 核分裂時の中性子発生数 :  (-)

$$\begin{aligned} N &= \text{} \times 7 \times \text{} \\ &= \text{} \Rightarrow \text{} \text{ (n/sec)} \end{aligned}$$

ここで、さらに増倍効果を考慮した中性子発生量  $N'$  (n/sec) を算定する。

$$N' = N \times \left( \frac{1}{1 - (k_{\text{eff}} + 3\sigma)} \right)$$

ここで、実効増倍率の設定は、中性子発生量が保守的に大きな値となるよう、燃料が冠水した状態の値 ( $k_{\text{eff}} + 3\sigma = \text{}$ ; 口章 E の冠水時の値) で計算する。

$$\begin{aligned} N' &= \text{} \times \left\{ 1 / (1 - \text{}) \right\} \\ &= \text{} \Rightarrow \text{} \text{ (n/sec)} \end{aligned}$$

(2) 燃料集合体表面の中性子束

中性子束が保守的に大きくなるよう燃料から発生する中性子が全て燃料集合体の外に放出されると仮定し、燃料集合体表面の中性子束  $\phi$  (n/cm<sup>2</sup>/sec) は中性子発生量を燃料集合体側面の面積で除して算定する。

$$\phi = N' / A$$

ここで、A : 燃料集合体側面の面積 (保守的に1体分の面積) = L × W × 4

L : 燃料有効部長さ : 364.8 (cm)

W : 燃料集合体幅 : 21.4 (cm) であることから、

$$\phi = \boxed{\phantom{000}} \Rightarrow \boxed{\phantom{000}} \text{ (n/cm}^2\text{/sec)}$$

(3) 使用予定期間における中性子照射量

使用予定期間 60 年の各部の累積中性子照射量  $\Sigma \phi$  を上記の燃料集合体表面位置で代表して、以下のように算定する。

$$\text{累積中性子照射量 } \Sigma \phi = \phi \times 60 \times 365.25 \times 24 \times 3600$$

$$= \boxed{\phantom{000000}} \Rightarrow \boxed{\phantom{000000}} \text{ (n/cm}^2\text{) 以下}$$

3. ボロン入りステンレス鋼中のボロン (<sup>10</sup>B) の減損率の算定

前項にて求めた燃料集合体表面の中性子束により、ボロン入りステンレス鋼が照射を受けるとして、使用予定期間における当該材料中の <sup>10</sup>B の減損率を算定する。

<sup>10</sup>B の減損数は、以下のように計算される。

$$D = n \times \sigma \times B$$

ここで、D : 単位体積当たりの <sup>10</sup>B の減損数 (1/cm<sup>3</sup>)

n : 単位面積当たりの中性子数 (累積中性子照射量) :  $\boxed{\phantom{000000}}$  (1/cm<sup>2</sup>)

$\sigma$  : <sup>10</sup>B の吸収断面積 :  $4 \times 10^{-21}$  (cm<sup>2</sup>)

(本輸送容器は気中で用いられるが、減損数が保守的に大きくなるよう水で減速されるとして熱中性子に対する値で計算)

B : ボロン入りステンレス鋼中の <sup>10</sup>B 原子個数密度 (1/cm<sup>3</sup>)

したがって、<sup>10</sup>B の減損率 F は以下のように求められる。

$$F = D / B = n \times \sigma$$

$$= \boxed{\phantom{000000}} \times 4 \times 10^{-21}$$

$$= \boxed{\phantom{000000}} \Rightarrow \boxed{\phantom{000000}} \text{ 以下}$$

以 上

(前回コメント反映)材料名称の統一  
(前回コメント反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

(イ)核燃料輸送物の説明

(イ)－A 目的及び条件

(1) 輸送物の使用目的

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

(2) 輸送容器の型名

MFC－1型

(3) 輸送物の種類

A型核分裂性輸送物

(4) 輸送容器に収納する収納物の種別及び個数

- |     |           |         |
|-----|-----------|---------|
| (イ) | 核分裂性物質の種類 | 核分裂性輸送物 |
| (ロ) | 輸送制限個数    | 制限なし    |
| (ハ) | 配列方法      | 任意      |

(5) 輸送指数 0.6以下

(6) 臨界安全指数 0

(7) 輸送物の総重量

□ kg 以下

(8) 輸送容器の外寸法

長さ	:	約	□ mm
外径	:	約	□ mm
高さ	:	約	□ m

(9) 輸送容器の重量

重量 : 約 □ kg

(10) 輸送容器の主要材料

外 殻	:	炭素鋼 (□)
緩 衝 材	:	木材 (□)
防振構造部	:	炭素鋼 (□) 及びボロンステンレス鋼
オ リ ン グ	:	□ ゴム
ショックマウント	:	□ ゴム

## (前回コメント反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

### (イ)－C 輸送容器

#### C.1 輸送容器の概要

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

輸送時で最大2体の燃料集合体を横2列に収納し、水平状態で輸送する。

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

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

#### C.2 輸送容器の構造

##### C.2.1 外 殻

###### (1) 上 蓋 ((イ)－第C.5図参照)

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

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

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

###### (2) 下部容器 ((イ)－第C.6図参照)

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

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

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

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

(前回コメント反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

C. 3 輸送容器の主要構成材料の材質及び寸法

主要構成材料の材質，寸法を(イ)－第C. 1表に示す。

C. 4 輸送容器の寸法及び重量

(イ) 輸送容器の外寸法

長 さ： 約  mm

外 径： 約  mm

高 さ： 約  mm

(ロ) 輸送容器の重量

重 量： 約  kg

C. 5 密封境界

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

密封境界を(イ)－第C. 21 図に示す。

(前回コメント反映)材料名称の統一

(イ)－第C.1表 輸送容器部材一覧表

主たる構造物	主要部材		材質	寸法(mm)	参照図面
外 殻	上 蓋	外 筒	炭 素 鋼		(イ)－第C.5図
		外 筒	炭 素 鋼		(イ)－第C.5図
		ドームプレート	炭 素 鋼		(イ)－第C.5図
		内 筒	炭 素 鋼		(イ)－第C.5図
		フ ラ ン ジ	炭 素 鋼		(イ)－第C.5図
		フ ラ ケ ッ ト	炭 素 鋼		(イ)－第C.5図
		締 付 ホ ル ト	合 金 鋼		(イ)－第C.3図, (イ)－第C.4図
		緩衝材(断熱材)		(イ)－第C.5図	
	下部容器	外 筒	炭 素 鋼		(イ)－第C.6図
		外 筒	炭 素 鋼		(イ)－第C.6図
		ドームプレート	炭 素 鋼		(イ)－第C.6図
		内 筒	炭 素 鋼		(イ)－第C.6図
		フ ラ ン ジ	炭 素 鋼		(イ)－第C.6図
		ショックマウント取付板	炭 素 鋼		(イ)－第C.6図
リ フ		炭 素 鋼	(イ)－第C.6図		
	0 リ ン グ	コ ム	φ10	(イ)－第C.6図	
	緩衝材(断熱材)			(イ)－第C.6図	
防振構造部	ショックマウント フレーム	サ イ ト レ ー ル	炭 素 鋼		(イ)－第C.7図
		ク ロ ス チ ュ ー ブ	炭 素 鋼		(イ)－第C.7図
		シ ョ ッ ク マ ウ ン ト			(イ)－第C.15図
			コ ム		
	クロスフレーム	ト ッ プ フ レ ー ム	炭 素 鋼		(イ)－第C.8図, (イ)－第C.9図
		ボ ト ム フ レ ー ム	炭 素 鋼		(イ)－第C.8図, (イ)－第C.9図
		ク ロ ス チ ュ ー ブ	炭 素 鋼		(イ)－第C.8図, (イ)－第C.9図
		サ イ ト ユ ニ ハ ー チ ャ ン ネ ル	炭 素 鋼		(イ)－第C.8図, (イ)－第C.9図
		ト ッ プ ユ ニ ハ ー チ ャ ン ネ ル	炭 素 鋼		(イ)－第C.8図, (イ)－第C.9図
		ス キ ン	ボ ロ ス テ ン レ ス 鋼		(イ)－第C.8図, (イ)－第C.9図

備 考 [ ]内数値は、タイプBの寸法を示す。



(前回コメント反映)材料名称の統一

主たる構造物	主要部材		材質	寸法(mm)	参照図面
	クロスフレーム	クッション			(イ) - 第C. 8 図, (イ) - 第C. 9 図
		クランピングフレーム	炭素鋼		(イ) - 第C. 13 図, (イ) - 第C. 14 図
		支持格子用ハット	炭素鋼		(イ) - 第C. 13 図, (イ) - 第C. 14 図
		支持格子押えボルト	炭素鋼		(イ) - 第C. 13 図, (イ) - 第C. 14 図
		シヤッキスクリュー	炭素鋼		(イ) - 第C. 11 図, (イ) - 第C. 12 図
		固定枠	炭素鋼		(イ) - 第C. 11 図, (イ) - 第C. 12 図
		ボトムサポート	炭素鋼		(イ) - 第C. 10 図
		アクリル	炭素鋼		(イ) - 第C. 10 図
補助的機材		湿度計			(イ) - 第C. 19 図, (イ) - 第C. 20 図
		リリーフバルブ			(イ) - 第C. 18 図
		補助脚	炭素鋼		(イ) - 第C. 16 図, (イ) - 第C. 17 図
		エアバルブ			(イ) - 第C. 19 図, (イ) - 第C. 20 図
		乾燥剤収納箱	炭素鋼		(イ) - 第C. 3 図, (イ) - 第C. 4 図
		枕木	木材		(イ) - 第C. 6 図
		ショック指示計	ステンレス鋼		(イ) - 第C. 3 図, (イ) - 第C. 4 図

備考 [ ]内数値は、タイプBの寸法を示す。

(前回コメント反映)材料名称の統一

(イ)－第D. 3表 燃料棒の主要部寸法

単位 mm

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

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

(イ)－第D. 4表 制御棒案内シンプルの主要部寸法

単位 mm

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

D. 4 収納物の構造材料

燃料集合体の主要構造材料を(イ)－第D. 5表に示す。

(イ)－第D. 5表 主要構造材料

主 要 部 材	材 質	備 考
燃料集合体		
被 覆 材	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4, MDA, ZIRLO
燃料ペレット押えばね	ステンレス鋼又は ニッケル基合金	
端 栓	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4
支持格子	ニッケル基合金又はジルコニウム合金	インコネル-718 又はジルカロイ-4
制御棒案内シンプル	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4
炉内計装用案内シンプル	ジルコニウム合金	ジルカロイ-4
ノ ズ ル	ステンレス鋼	
アダプタプレート	ステンレス鋼	
制御棒クラスタ		
スパイダ本体	ステンレス鋼	
ベ ー ン	ステンレス鋼	
フィンガ	ステンレス鋼	
被 覆 管	ステンレス鋼	
吸 収 材	銀, インジウム, カドミウム合金	
スペーサ		
スペーサ本体	炭 素 鋼	(14×14 10 フィート用スペーサ)

## (前回コメント反映)材料名称の統一

### D. 5 収納物の物理的及び化学的性質

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

#### D. 5.1 耐熱性

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

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

#### D. 5.2 耐腐食性

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

#### D. 5.3 電気化学的反応

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

## (前回コメント反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

### (ロ)－A 構造解析

#### A. 1 構造設計

##### A. 1. 1 概 要

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

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

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

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

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

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

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

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

容器が開封された場合には、それがわかるようになっている。

(前回コメント反映)材料名称の統一

記号の説明

$\sigma$  : 主応力  $\tau_t$  : ねじり応力  
 $\sigma_t$  : 引張応力 F : 荷重  
 $\sigma_c$  : 圧縮応力 P : 圧力  
 $\tau$  : せん断応力 A : 断面積

(ロ) - 第A.4表(1) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

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

記号の説明

$\sigma$  : 主応力       $\tau_t$  : ねじり応力  
 $\sigma_t$  : 引張応力     $F$  : 荷重  
 $\sigma_c$  : 圧縮応力     $P$  : 圧力  
 $\tau$  : せん断応力     $A$  : 断面積

(ロ) - 第A.4表(2) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

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

記号の説明

$\sigma$  : 主応力       $\tau_t$  : ねじり応力  
 $\sigma_t$  : 引張応力       $F$  : 荷重  
 $\sigma_c$  : 圧縮応力       $P$  : 圧力  
 $\tau$  : せん断応力       $A$  : 断面積

(ロ) - 第A.4表(3) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

要件	設計条件				解析方法		備考			
	参照図	材質	温度	設計		適用数式または要素		解析基準		
				種類	安全係数				負荷要素	
圧外筒	-	炭素鋼	73°C	ΔP=0.05MPa	1	引張応力	$\sigma_a = \frac{PD}{2t}$	$S_y \cdot \eta$	D = 内径 t = 肉厚	
							(ロ) - 第A.14図	炭素鋼	73°C	振動
熱的試験 応力計算 (1) 外筒 (2) ドームプレート (3) 燃料棒被覆管 (4) 燃料棒溶接部	(ロ) - 第A.20表 (ロ) - 第A.20表 (ロ) - 第A.15図 (ロ) - 第A.15図	炭素鋼 炭素鋼 ジルコニウム合金 (ZIRLO-4, MDA 及びZIRLO) ジルコニウム合金 (ZIRLO-4, MDA 及びZIRLO)	73°C 73°C 73°C 73°C	内圧 内圧 内圧 内圧	1 1 1 1	引張応力 組合せ応力 組合せ応力 組合せ応力	$\sigma_a = \frac{PD}{2t\eta}$	S <sub>y</sub>	S <sub>y</sub>	溶接効率1.0
							平板のたわみ式	S <sub>y</sub>		
							薄板の円筒の式	S <sub>m</sub>		
							薄板の円筒の式	S <sub>m</sub>		
水噴霧	-	-	73°C	水噴霧	1	吸水切り	給水性 水切り性	無 有		

記号の説明

$\sigma$  : 主応力       $\tau_t$  : ねじり応力  
 $\sigma_t$  : 引張応力       $F$  : 荷重  
 $\sigma_c$  : 圧縮応力       $P$  : 圧力  
 $\tau$  : せん断応力       $A$  : 断面積

(ロ) - 第A. 4表(4) 輸送容器の構造設計の条件及び解析方法

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



(前回コメント反映)材料名称の統一

A. 2 重量及び重心

輸送物の重量は(ロ)－第A. 5表の通りである。

(ロ)－第A. 5表 各部の最大重量

単位：kg

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

注：燃料棒集合体 1 体あたりの重量は、各タイプのうちでの最大重量を示す。

輸送物の重心位置は(ロ)－第A. 1 図に示す。

A. 3 材料の機械的性質

解析に用いる材料の機械的性質の一覧を(ロ)－第A. 6表に示す。

解析基準値となる材料の機械的性質を(ロ)－第A. 7表に示す。

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

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

尚、緩衝材に使用している  の圧縮変形応力を(ロ)－第A. 8表に示す。

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

(前回コメント反映)材料名称の統一

(前回コメント反映)材料名称の(反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

(ロ) - 第A. 6 表 材料の機械的性質

材 料	材 質	主要適用部品	設計応力強さ $S_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	設計降伏強さ $S_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	設計引張強さ $S_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	縦 弾 性 係 数 E (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮変形圧力 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
炭 素 鋼	[ ]	容 器 外 筒 防 振 構 造 部	-	(ロ) - 第 A. 2 図	(ロ) - 第 A. 2 図	(ロ) - 第 A. 7 表	-
炭 素 鋼	[ ]	締 付 ボ ル ト	-	(ロ) - 第 A. 3 図	(ロ) - 第 A. 3 図	(ロ) - 第 A. 7 表	-
ジルコニウム 合 金	ジルコイ-4, MDA 及び ZIRLO	燃 料 棒 被 覆 管	(ロ) - 第 A. 4 図	(ロ) - 第 A. 4 図	(ロ) - 第 A. 4 図	(ロ) - 第 A. 7 表	-
木 材	[ ]	緩 衝 材	-	-	-	-	(ロ) - 第 A. 8 表
ボ ロ ン ス テ ン レ ス 鋼	-	防 振 構 造 部	-	(ロ) - 第 A. 7 表	(ロ) - 第 A. 7 表	-	-

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

(前回コメント反映)材料名称の統一

(ロ) - 第A. 7表 設計基準値となる材料の機械的性質

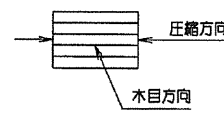
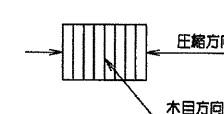
	評 価	材 料	T	S <sub>m</sub>	S <sub>y</sub>	S <sub>u</sub>	E
1	容 器 外 筒 防 振 構 造 部	炭素鋼 ( )	80				
2	締 付 ボ ル ト	炭素鋼 ( )	80				
3	燃 料 棒 被 覆 管	ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4)	80				
		(MDA)	80				
		(ZIRLO)	80				
4	防 振 構 造 部	ボロン ステンレス鋼	80				

記号の説明

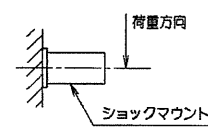
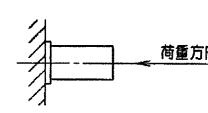
- T : 温度 (°C)  
 S<sub>m</sub> : 設計応力強さ (N/mm<sup>2</sup>)  
 S<sub>y</sub> : 設計降伏強さ (N/mm<sup>2</sup>)  
 S<sub>u</sub> : 設計引張強さ (N/mm<sup>2</sup>)  
 E : 縦弾性係数 (×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>)

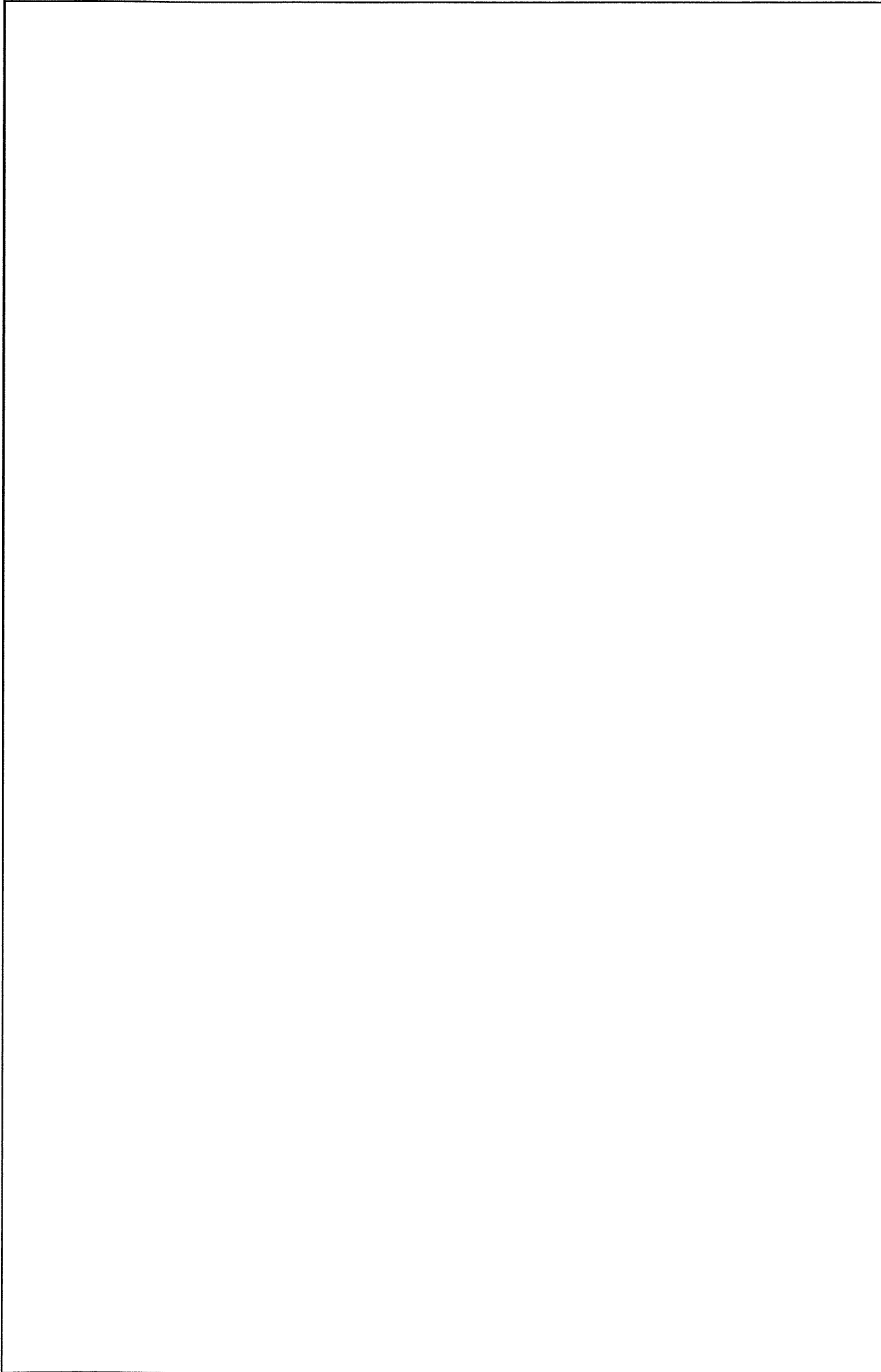
ジルコニウム合金である ( ) の解析基準値に用いられる  
 S<sub>u</sub> 及び S<sub>m</sub> は ( ) の強度より大きいことから ( ) の  
 機械的性質で評価を行う。

(ロ) - 第A. 8表 木材 ( ) の圧縮変形応力<sup>[4]</sup>

木目方向	圧縮変形応力 σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	備 考
木目方向に 平行方向圧縮	( )	
木目方向に 直角方向圧縮	( )	

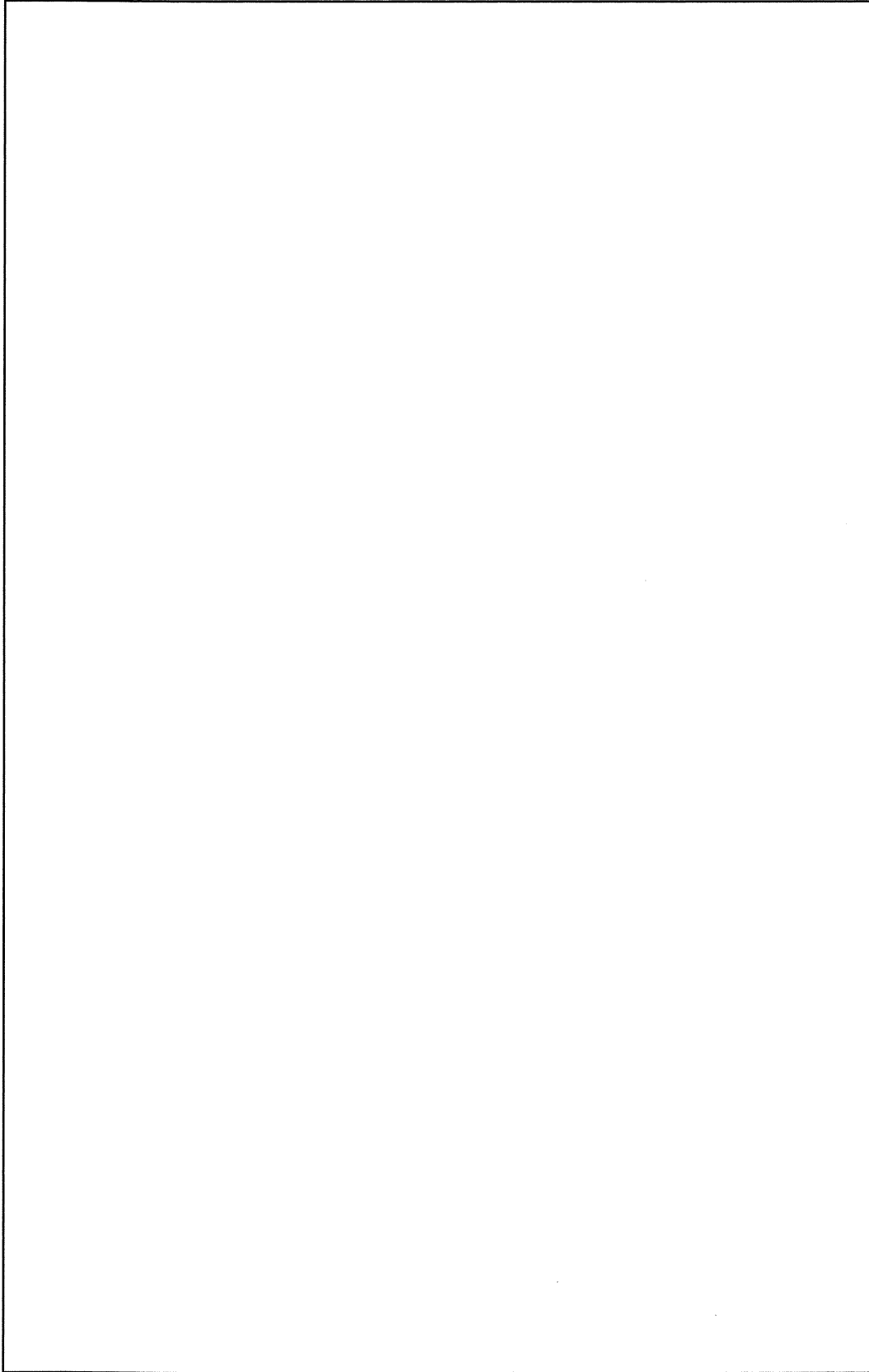
(ロ) - 第A. 9表 ショックマウント動的ばね定数<sup>[5]</sup>

荷 重 方 向	動的ばね定数 K (N/mm)	備 考
せん断方向	( )	
圧 縮 方 向	( )	



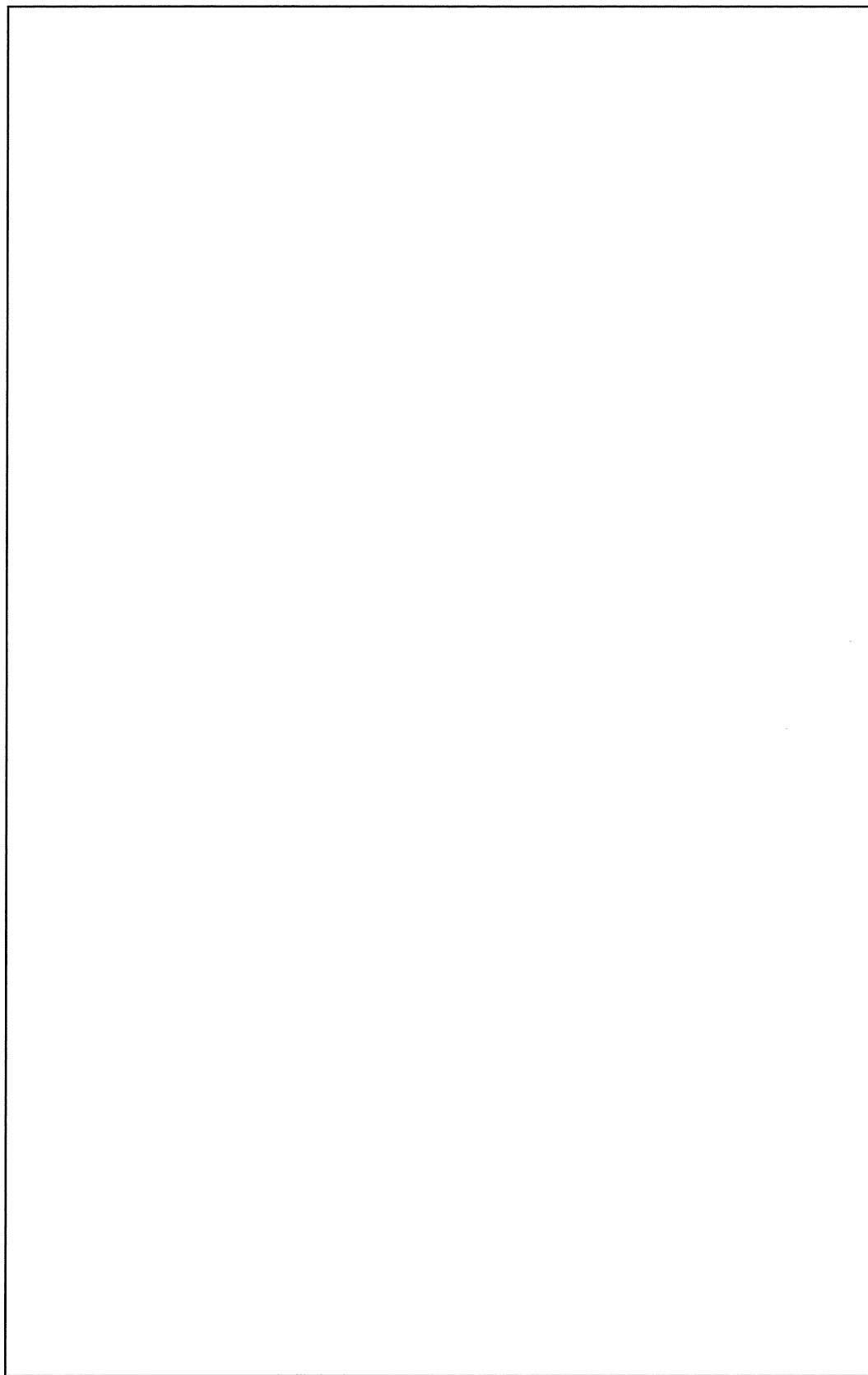
(ロ)－第A.2図 炭素鋼 (□) の温度に対する機械的性質の変化

(前回コメント反映)材料名称の統一



(口) - 第A. 3 図 炭素鋼 (口) の温度に対する機械的性質の変化

(前回コメント反映)材料名称の統一



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

(前回コメント反映)材料名称の統一

A. 4 核燃料輸送物の要件

A. 4. 1 化学的及び電氣的の反応

輸送物中の相互接触する異種材料を(ロ)－第A. 10表に示す。

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

(ロ)－第A. 10表 接触する異種材料の一覧

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

(前回コメント反映)材料名称の統一

A.4.2 低温強度

(ロ)－第A.11表<sup>[9]</sup>に、各地区の最低気温を示す。

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

(ロ)－第A.11表 各地区の最低気温

	最低気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	地名
川内	-6.7	鹿児島
玄海	-8.2	福岡
伊方	-8.3	松山
高浜 大飯 美浜 敦賀	-15.1	福井
泊	-15.7	寿都

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

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

(ロ)－第A.12表 主要材料一覧

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



(前回コメント反映)材料名称の統一

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

## (2-4)本文との引用/つながりの明記

### A. 4. 4 吊上装置

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

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

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

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

#### (1) 吊上装置

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

#### (2) 締付ボルト

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

この時、解析負荷荷重は以下のようにする。

解析負荷荷重 ( $W_a$ ) は吊上最大重量の3倍とする。

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

$W_a$  : 解析負荷荷重 (N)

$m$  : 輸送物最大重量  (kg)

$$W_a = \text{} \times 3 \times 9.81$$

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

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

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

P : 荷重 (N)

(2-6) ゴムの経年変化(硬化)の安全評価への影響有無(ないことの明確化)  
 (前回コメント反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

(i) ジャッキスクリューの座屈

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

ジャッキスクリューが受ける衝撃荷重Pは次式にて与えられる。

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

ここで、

m : 燃料集合体 (非核燃料炉心構成品含む) の重量

=  (kg)

N : 燃料集合体に生ずる衝撃加速度

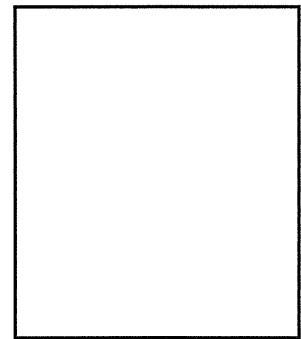
=  (m / s<sup>2</sup>)

n : ジャッキスクリューの本数  (本)

従って以下の値となる。

P =

=  (N)



(ロ) - 第A. 24 図  
 ジャッキスクリューの解析モデル

また、ジャッキスクリューの座屈限界荷重P<sub>K</sub>は次式にて与えられる。

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

ここで、

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

従って以下の値となる。

P<sub>K</sub> =

=  (N)

(前回コメント反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

座屈限界荷重に対する余裕率 $M_s$ は

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

$$= \text{[ ]}$$

$M_s$ が正であるからジャッキスクリューは健全である。

(ii) ジャッキスクリュー及び固定枠のねじ山の強度

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

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

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

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

ここで、

$W_a$  : ジャッキスクリューにかかる荷重

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

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

$m$  : 燃料集合体（非核燃料炉心構成品含む）の重量

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

$N$  : 燃料集合体に生ずる衝撃加速度 =  $\text{[ ] (m/s}^2)$

$n$  : ジャッキスクリューの本数 =  $\text{[ ] (本)}$

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

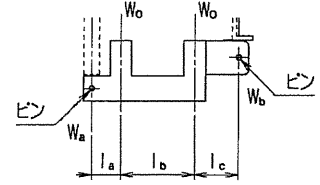
(前回コメント反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

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

(ロ)－第A. 25 図よりピンの部分に生ずる荷重は次のように表わされる。

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

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



(ロ)－第A. 25 図  
固定枠の解析モデル(1)

ここで、

$W_o$  : ジャッキスクリユーに生ずる衝撃荷重 (N)

$$W_o = \frac{m}{n} \times N = \boxed{\phantom{000}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N)}$$

$m$  : 収納物の最大重量 =  (kg)

$n$  : ジャッキスクリユーの本数 =  (本)

$N$  : 衝撃加速度 =  ( $m/s^2$ )

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

$l_b$  : ジャッキスクリユー中心間距離 =  (mm)

$l_c$  : ジャッキスクリユー中心より反対側支点までの距離 =  (mm)

以上より

$$W_a = \boxed{\phantom{000}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N)}$$

$$W_b = \boxed{\phantom{000}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ (N)}$$

ところで、固定枠のD部は剛構造であるため、A断面及びB断面に生ずる応力、また、C断面に生ずる応力を(ロ)－第A. 26 図のようにモデル化し評価する。

曲げ応力 ( $\sigma_b$ )、せん断応力 ( $\tau$ ) は次の式より求められる。

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

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

$M_i$  : 曲げモーメント

$$M_i = W_i \cdot l_i$$

$W_i$  : ジャッキスクリユーにかかる衝撃荷重 (N)

$l_i$  : 解析モデルのはりの長さ (mm)

((ロ)－第A. 22 表参照)

(前回コメント反映)タイプA/Bが部位の相違であることの明確化

(ロ) - 第A.22表 各 部 に 生 ず る 応 力

項 目	記 号	A断面 ( i = 1 )		B断面 ( i = 2 )		C断面 ( i = 3 )	
		タイプA	タイプB	タイプA	タイプB	タイプA	タイプB
衝 撃 荷 重	$W_i$	(N)					
はりの断面幅	$b_i$	(mm)					
はりの断面高さ	$h_i$	(mm)					
はりの長さ	$l_i$	(mm)					
断 面 積	$A_i$	(mm <sup>2</sup> )					
断 面 係 数	$Z_i$	(mm <sup>3</sup> )					
曲げモーメント	$M_i$	(N・mm)					
曲 げ 応 力	$\sigma_{b_i}$	(N/mm <sup>2</sup> )					
せん断応力	$\tau_i$	(N/mm <sup>2</sup> )					
合 成 応 力	$\sigma$	(N/mm <sup>2</sup> )					

## (2-3)容器の疲労評価の削除

### A.10.9 疲労評価

口章Fの検討を踏まえ、A 4. 4項の吊り上げ装置を対象に、技術基準への適合性を評価する上で、経年変化要因として疲労に対する健全性について評価する。

吊り上げ装置の疲労評価は、応力集中を考慮し繰返しピーク応力強さによる許容繰返し回数と使用計画回数を比較して評価を行う。繰返しピーク応力強さ（ $S_p$ ）は次式にて与えられる。

$$S_p = \frac{S}{2} \cdot k_f \cdot \frac{E_o}{E}$$

S：応力強さ（ $N/mm^2$ ）

$k_f$ ：疲労強度減少係数

$E_o$ ：設計疲労線図<sup>[1]</sup>に示される基本縦弾性係数= $2.07 \times 10^5$ （ $N/mm^2$ ）

E：最高温度（80℃）での縦弾性係数

(): () ( $N/mm^2$ )    (): () ( $N/mm^2$ )

ここでの応力強さSは実際に作用する荷重をベースとし、

より想定される負荷係数 () を用いて算出する。

応力強さSの算出方法はA 4. 4項と同様である。許容繰返し回数 $N_a$ は設計建設規格<sup>[1]</sup>中に示される設計疲労線図により算出する。評価対象部位について、クロスピンは定期交換を行うため、それ以外のブラケット、外筒、締付ボルトを評価対象とする。

評価条件及び評価結果を(口)－第A.43表に示す。ここで、吊り上げ装置の使用計画回数は6000回（F. 1項参照）であり、許容繰返し回数を十分下回っている。従って、吊り上げ装置の疲労強度は十分である。

(ロ)－B 熱解析

B.1 概要

B.1.1 熱設計

本輸送物の構成図を(ロ)－第B.1図に示す。

本輸送物は上蓋，下部容器（外筒，及び内筒），ショックマウント，クロスフレームより構成されている。

輸送容器は，厚さmmの木材を鋼板でサンドイッチした構造であり，外筒鋼板厚さmm（一部mm），内筒厚さmmの炭素鋼製で，外径mm，内径mm，長さについては全長mm，容器内空間mmの円筒形である。

収納物である燃料棒は，ヘリウムガスは最大MPa・Gの圧力で封入されている。

また，燃料棒は全数ヘリウム漏洩検査を実施している。

収納物と内筒間の熱の流れは防振構造部によって影響を受けることはほとんどない。従って，防振構造部は解析から除外する。また，木材は熱伝導率が小さいので耐火試験時には，収納物を高温雰囲気から保護する断熱材の役目も兼用している。

収納物より発生する熱は微小であるため無視できる。輸送容器外面への太陽放射熱や火災時の熱は輻射及び対流により伝えられる。

一般の試験条件時は容器が健全な水平状態のモデルとし，また，特別の試験条件時は輸送容器が変形したモデルとし，密封境界である燃料棒被覆管の温度に対して安全側になるように解析を行う。

B.1.2 熱解析

熱解析は，規則及び告示に規定された一般の試験条件及び特別の試験条件下における輸送物の熱的特性について行った。

(1) 一般の試験条件下における熱的条件は以下の通りである。

- (a) 輸送物は38℃の空気におく。
- (b) 太陽熱の放射を受けるものとする。

(2) 特別の試験条件下における熱的条件は以下の通りである。

- (a) 輸送物は雰囲気放射率0.9である800℃の環境に30分間さらされる。

この場合，太陽放射熱を受けるものとし，輸送物表面の吸収率は0.8とする。

(b) (a)の条件下においた後

- (i) 輸送物は38℃の空気において一週間放置する。
- (ii) 太陽熱の放射を受けるものとする。



(前回コメント反映)材料名称の統一

B. 1. 3 熱解析の条件と方法

熱解析の条件として用いた収納物の発熱量，一般及び特別の試験条件に対する輸送物の環境条件及び輸送物の輻射率（放射率及び吸収率）を(ロ)－第B. 1表に示す。

(ロ)－第B. 1表 熱解析条件

項目		条件		特別の試験条件		
		一般の試験条件		火災前	火災時	火災後
発熱量		0	0	0	0	0
環境条件	周囲温度	静止空気 38℃	静止空気 -20℃	静止空気 38℃	30分 800℃	静止空気 38℃
	太陽放射熱	有	無	有	有	有
	周囲放射率	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0
輸送物の 輻射率	外筒表面	(a) □	(a) □	(a) □	(d) 0.8 □	(e) □
	内筒表面	—	—	(b) □	□	□
	燃料棒表面	—	—	(c) □	□	□

- (a) 火災にさらされる前の表面放射率（塗装表面） 参考文献〔9〕
- (b) 炭素鋼の表面放射率 " 〔9〕
- (c) ジルコニウム合金の表面放射率 " 〔12〕
- (d) 火災時の表面放射率（炭素鋼） " 〔4〕
- (e) 火災後 " (炭素鋼) " 〔4〕

また，解析の実施方法を(ロ)－第B. 2表に示す。

(ロ)－第B. 2表 熱解析の方法

項目		
収納物仕様		新燃料集合体(イ)章D参照
最大発熱量		0 W
計算モデル	輸送容器	2次元1/4象限モデル
	収納物	均質化近似
温度分布計算		非定常熱解析コード TRUMP (付属書類B. 6. 3参照)
使用物性値（熱的性質）		B. 2材料の熱的性質参照

## (前回コメント反映)材料名称の統一

### B.2 材料の熱的性質

本輸送物の構成材料はイ章C.3に示す通りである。これらの材料のうち、熱解析で用いた材料の熱的性質を以下に示す。

#### (1) 炭素鋼

炭素鋼の熱的性質を(ロ)－第B.3表に示す。このデータは参考文献〔3〕〔4〕より引用している。この材料は内筒及び外筒に用いられている。

(ロ)－第B.3表 炭素鋼の熱的性質

温度 (°C)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (mW/m·K)
0			
200			
400			
500			
800			

#### (2) 木材

木材の熱的性質を(ロ)－第B.4表に示す。このデータは実験に基づいている。この材料は外筒と内筒との間に用いられ熱的には断熱効果がある。

(ロ)－第B.4表 木材 ( ) の熱的性質

温度 (°C)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (mW/m·K)
0			
50			
100			
150			
200			
250			
275			
320			
350			
500			
900			

(前回コメント反映)材料名称の統一

(5) 燃料棒被覆管

燃料棒被覆管 (ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4, MDA及びZIRLO)) の熱的性質を(ロ)-第B. 7表に示す。このデータのうち密度, 比熱は文献〔6〕に, 熱伝導率は文献〔8〕に基づいている。

(ロ)-第B. 7表 燃料棒被覆管の熱的性質

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	熱伝導率 (mW/m·K)	比熱 (kJ/kg·K)

(6) 均質化燃料

均質化燃料の熱的性質を(ロ)-第B. 8表に示す。本解析モデルに用いる均質化燃料の物性値及び計算式は付属書類B. 6. 5に示す。

(ロ)-第B. 8表 均質化燃料の熱的性質

温度 (°C)	等価密度 (g/cm <sup>3</sup> )	等価比熱 (kJ/kg·K)	等価熱伝導率 (mW/m·K)
100			

B. 3 構成要素の仕様

熱解析をする上で関連する構成要素の仕様を以下に述べる。

(1) Oリング

Oリングは容器内への海水等の浸入を防ぐために用いられている。

本輸送物で使われているOリングの材質は  ゴムであり, 使用可能範囲は  °Cである。輸送物の使用温度範囲は-20°C~73°Cであり, Oリングは十分使用に耐える。

(2) リリーフバルブ

リリーフバルブは下部容器上部に取付られており, 内圧をある程度一定に保つために設けられている。Oリングの材質は  ゴムでありバルブの最大使用圧力は0.20MPa abs, 使用可能温度範囲は  °Cである。

それに対し容器内空間の最大圧力は0.120MPa abs, 温度範囲は-20°C~73°Cでありバルブは十分その使用に耐える。

(前回コメント反映)材料名称の統一

(ロ)－第B.9表 一般の試験条件下の熱的条件

項目	条件
崩壊熱 (W)	0
輸送容器表面の輻射率	<input type="text"/>
周囲温度 (°C)	38
太陽放射熱 (W/m <sup>2</sup> )	400

(3) 輸送物の伝熱

本輸送物の伝熱について以下に説明する。

- (a) 輸送物は、一般の試験条件下では変形が小さいので、変形は無視する。
- (b) 入熱量（太陽放射熱）と熱放出（大気への自然対流及び輻射）が平衡であるモデルの輸送容器表面について定常熱計算を行う。
- (c) 輸送物の最高温度は前記(b)の容器表面最高温度とする。

以上の条件より簡易計算で定常熱計算を実施した。

詳細は付属書類B.6.2に示した。

B.4.1.2 試験モデル

該当せず。

B.4.2 最高温度

B.6.2にて求めた輸送物の最高温度は73°Cである。

B.4.3 最低温度

一般の試験条件下における輸送物の最低温度は、収納物の崩壊熱が小さく無視するため、輸送物各部の温度は使用条件上の外気最低温度と平衡状態になり、-20°Cとする。

このとき、輸送容器に使用しているOリング (ゴム) は使用可能温度範囲 (°C) 以内にあるので、十分その性能を維持できる。また、輸送容器に使用している炭素鋼及び、燃料被覆管に使用しているジルコニウム合金は-20°Cにおいて低温脆性による破壊は生じない。

以上のように-20°Cにおいて本輸送物の密封性は保たれる。

B.4.4 最大内圧

一般の試験条件下における輸送物最高温度は、B.4.2項で述べたように73°Cである。一般の試験条件下における最大内圧の評価に当たっては、輸送物が一様に73°Cになったものとして、輸送容器と収納物である燃料棒の上昇圧力を求める。

## (前回コメント反映)材料名称の統一

### B.4.6 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下における輸送物の最高温度は73℃、最低温度は-20℃である。最高温度における輸送容器の内圧上昇は0.019MPaである。また、Oリング( )ゴム)は使用可能温度範囲内( )℃)にあるので十分その性能を維持できる。

収納物である燃料棒の内圧は MPa・G となり、この時燃料棒の健全性は保たれる。

熱応力については、熱膨張を拘束するものがないので、熱応力の発生はない。最低温度(-20℃)においては、密封境界を形成する燃料棒被覆管(ジルコニウム合金)の低温脆性による破壊は生じない。

以上より一般の試験条件下において、収納物の密封性は維持される。

### B.5 特別の試験条件

本輸送物は規則に基づき、特別の試験条件下での評価はA型輸送物としての要件はなく、核分裂性輸送物としての要件に従い評価する。

#### B.5.1 熱解析モデル

特別の試験条件下における熱評価を、3次元非定常熱解析コードTRUMPを用いて行った。

##### B.5.1.1 解析モデル

ここでは、TRUMPによる計算に用いた以下の項目について述べる。

###### (1) 形状モデル

本輸送容器は、(ロ)章A構造解析のA.9.2の核分裂性輸送物の条件で示したように特別の試験条件下の落下試験Ⅰ及び落下試験Ⅱにおいて局所的な変形が生じる。

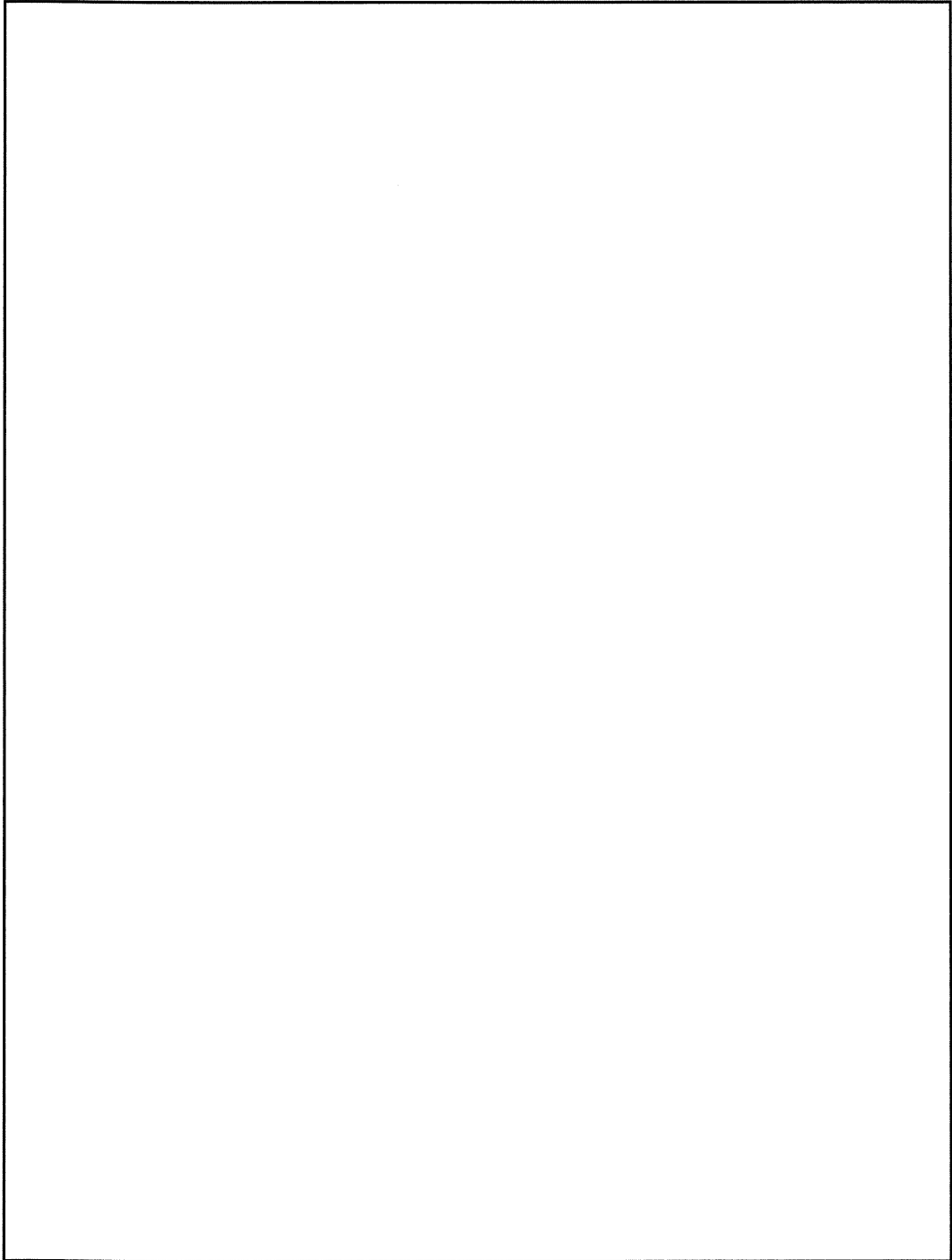
すなわち、外筒及び内筒は落下試験Ⅰにより全長にわたって変形が生じ、落下試験Ⅱにより局所的な変形が生ずる。

熱解析では、構造解析での落下事象の連続性(核分裂性輸送物の要件)を考慮した変形状態をモデル化し、(ロ)-第B.2図に示すように内外の局所的な変形が全周にわたって生ずる安全側のモデルとした。

外殻の( )の厚さは、落下試験Ⅰの結果を考慮し、安全側に( )mmとした。

落下試験Ⅱの影響については、付属書類B.6.8に示す原型容器試験結果から、落下試験Ⅱを行った部分(断面(A)-(A))と落下試験Ⅱを行っていない部分(断面(B)-(B))と比較すると、耐火試験時の外殻内面の到達温度に有意差はないため、この解析において、落下試験Ⅱの影響については無視した。

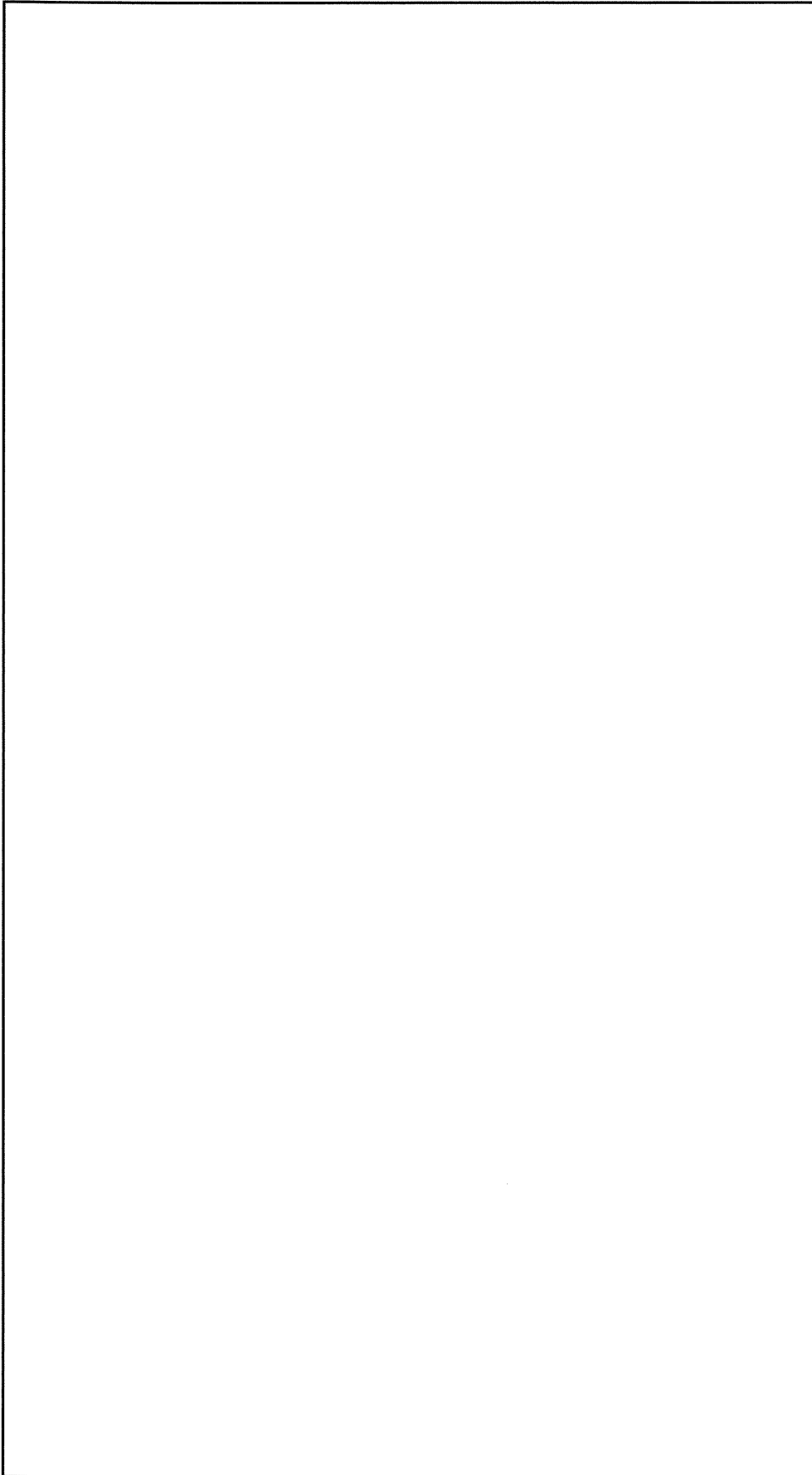
(前回コメント反映)材料名称の統一



(口)－第B. 2 図 落下試験 I における変形状図

(口)－B－11

(前回コメント反映)材料名称の統一



(ロ)ー第B. 3 図 特別の試験条件下の解析モデル、寸法及び領域境界条件図

(前回コメント反映)材料名称の統一

(ロ)－第B.12表 一般及び特別の試験条件下における燃料棒及び容器内空間の最高圧力

(単位 MPa・G)

項目 部位	一般の試験条件下での圧力	特別の試験条件下での圧力
燃料棒	□	□
容器内空間	0.019	—

(ロ)－第B.4図に示した各部の最高温度と、火災事故発生からの時間をまとめると、(ロ)－第B.11表に示す通りである。また、密封境界である燃料棒の最大圧力は(ロ)－第B.12表に示す通りである。

以上より、密封境界である燃料棒被覆管は特別の試験条件下においても健全である。特別の試験条件下における輸送物の総合的評価の詳細を(ロ)－第B.13表に示す。

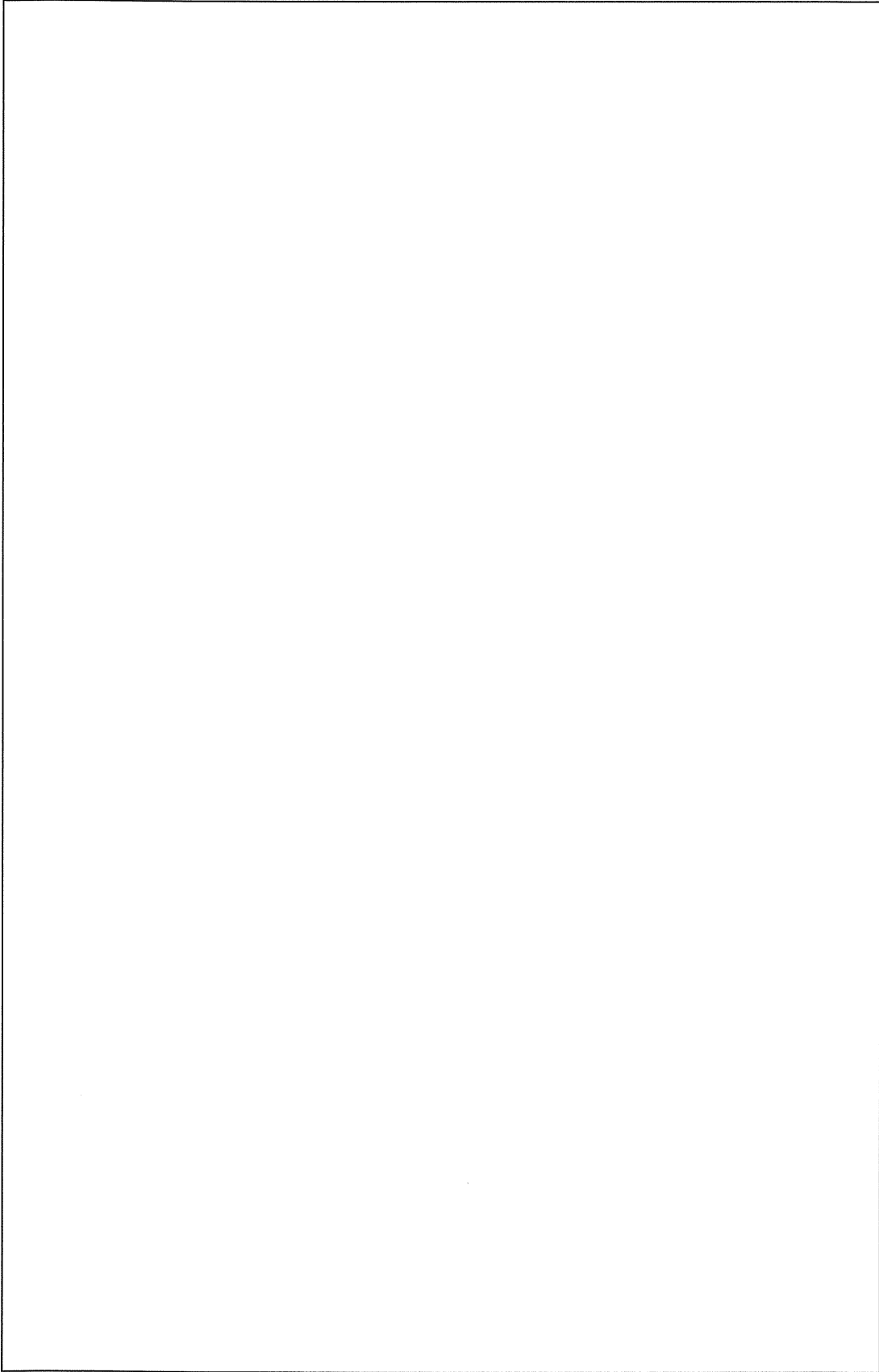
これらの結果より、本輸送物の密封境界である燃料棒被覆管は特別の試験条件下においても健全性を保つ。

(ロ)－第B.13表 特別の試験条件下における輸送物の総合的評価

項目	基準値	結果	備考
最高温度 燃料棒 内筒 外筒	□		基準値を満足
最大応力 燃料棒被覆管 (ジルコニウム合金)			基準値を満足



(前回コメント反映)材料名称の統一



(ロ)ー第B.4図 特別の試験条件下での各部温度履歴

## (前回コメント反映)材料名称の統一

### C. 5 結果の要約及びその評価

一般及び特別の試験条件下において、構造解析(口)－A. 5. 3及び(口)－A. 9. 2項で述べたように燃料棒は破損することなく、密封性は健全である。

また、熱解析B. 4. 4で述べたように、輸送中に予想される輸送物の最高温度73℃が燃料棒の内部温度とした場合の内圧は、MPa・Gとなり、燃料棒に発生する一次一般膜応力はN/mm<sup>2</sup>と、燃料棒被覆管に用いるジルコニウム合金の設計応力強さN/mm<sup>2</sup>に比べ十分小さいので密封性は確保される。

また、構造解析の特別の試験条件A. 9. 2で解析し、原型試験で実証されたように((口)－G原型容器試験結果報告書参照)9mの落下衝撃に対しても密封境界としての健全性は維持される。

更に、熱解析の特別の試験条件B. 5. 4で解析したように800℃、30分の環境下にさらされても、燃料棒は破損することなく密封性は維持される。

(前回コメント反映)材料名称の統一

C. 6 付属書類

C. 6. 1 密封境界の構造材

密封境界の構造材を(ロ)－第C. 1表に示す。

(ロ)－第C. 1表 密封境界の構造材 (温度) (1/2)

型 式	部品名	温 度 (°C)					
		現行燃料			高燃焼度燃料		
		一般の試験条件	特別の試験条件	最高使用可能 <sup>(1)</sup>	一般の試験条件	特別の試験条件	最高使用可能 <sup>(1)</sup>
14×14 型 10 フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓	73			—	—	—
14×14 型 15×15 型 12 フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓	73			73		
17×17 型 12 フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓	73			73		

(ロ)－第C. 1表 密封境界の構造材 (圧力) (2/2)

型 式	部品名	圧 力 (MPa・G)					
		現行燃料			高燃焼度燃料		
		一般の試験条件	特別の試験条件	使用可能圧力 <sup>(2)</sup>	一般の試験条件	特別の試験条件	使用可能圧力 <sup>(2)</sup>
14×14 型 10 フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						
14×14 型 12 フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						
15×15 型 12 フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						
17×17 型 12 フィート	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						
17×17 型 12 フィート (改良タイプ)	燃料棒被覆管 燃料棒端栓						

(1) ジルコニウム合金の特性から来る Zr の β 変態点。また、融点は  °C

(2) 一般の試験条件の場合、被覆管に発生する周方向引張応力が  N/mm<sup>2</sup> となる内圧 (at 73°C)

特別の試験条件の場合、被覆管に発生する周方向引張応力が  N/mm<sup>2</sup> となる内圧 (at  °C)

## (前回コメント反映)材料名称の統一

### D.3 モデル仕様

#### D.3.1 解析モデル

##### (1) 通常の輸送条件

通常の輸送条件の遮蔽解析においては、燃料集合体と輸送物の外筒のみを遮蔽体として考慮し、輸送物の内筒（厚さ□mm）及び内筒と外筒の間の木材（厚さ□mm）は無視する。外筒の厚さは□mmであるが板厚公差を考慮し、□mmとして評価する。

本輸送物には2体の燃料集合体が収納されるが、遮蔽解析は燃料集合体1体について行い、その結果を2倍することにより輸送物1基当りの評価とする。

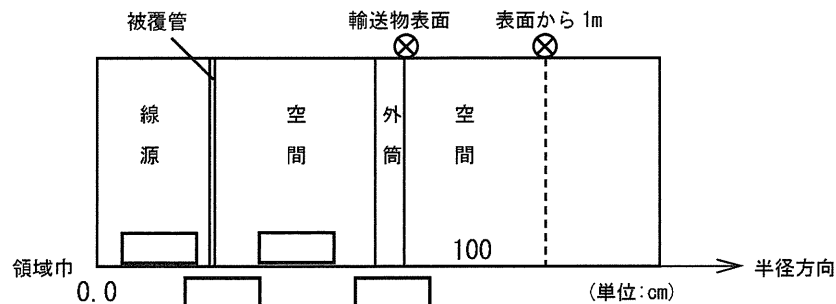
燃料集合体は等価な断面を有する円筒形状にモデル化し、外面に燃料棒被覆管の肉厚を残して内部の燃料棒を均質化する。

燃料集合体と輸送物の表面までの距離は(ロ)－第D.1図に示すように、最短距離でモデル化する。



(ロ)－第D.1図 燃料集合体と輸送物の表面までの最短距離（通常の輸送条件）

以上のモデル化に基づく、通常の輸送条件の遮蔽解析モデルを(ロ)－第D.2図に示す。



(ロ)－第D.2図 通常の輸送条件の遮蔽解析モデル  
(燃料集合体1体当たり、1次元円筒形状)

## (前回コメント反映)材料名称の統一

### D. 4 遮蔽評価

#### D. 4. 1 通常の輸送条件

通常の輸送条件の遮蔽評価は、燃料集合体1体に対して(ロ)－第D. 2図の解析モデルを用いて次元輸送計算コードANISNで行い、結果を収納体数倍(2倍)することにより線量当量率を得る。D. 3. 1に示したように、解析モデルでは内筒及び内筒と外筒間の木材を無視したうえで、燃料集合体と輸送容器表面までの最短距離を用いていること、またANISN計算では有限長の線源を無限円筒にモデル化していることから、この手法は十分安全側である。

ANISNコードの説明を(ロ)－D. 6. 2に示す。

断面積はDLC23E/CASKライブラリのガンマ線18群のP<sub>3</sub>輸送定数セットを使用する。このエネルギー群構造と線量当量率を求めるために用いた線量当量率変換係数を(ロ)－第D. 5表に示す。

線量当量率変換係数はICRP Publ. 74の値に基づくものである。

ANISN計算はS-8分点セットを用いて行う。

本輸送物の通常の輸送条件の遮蔽解析の結果を(ロ)－第D. 6表に示す。

#### D. 4. 2 一般の試験条件

一般の試験条件下の遮蔽評価は、通常の輸送条件と同一の手法を用いて評価を行うものとし、一般の試験条件下による最大変位を考慮して行う。

以上の手法で求めた一般の試験条件下の遮蔽解析の結果を(ロ)－第D. 6表に示す。

また、一般の試験条件下の線量当量率の増加率は(ロ)－第D. 6表より、著しい増加はなく、解析値は基準値と比較し、十分低く基準を満足している。

(前回コメント反映)材料名称の統一

D. 5 結果の要約及びその評価

本輸送物の遮蔽解析で得られた線量当量率の結果を(ロ)－第D. 6表に示す。(ロ)－第D. 6表は、以下の点から安全側な結果を与えている。

(1) 線源強度の計算、遮蔽計算はそれぞれコードの信頼性が幅広く認められている燃焼計算コードORIGEN-2及び輸送計算コードANISNを用いている。

なお、線源強度の計算については、最大濃縮度5.0wt%のウラン同位体組成をもとに輸送までの期間として安全側に10年を仮定して評価している。

(2) 解析モデルは次に示す如く安全側に設定している。

- a) 燃料集合体と輸送物の表面までの最短距離を用い、燃料集合体1体からの線量当量率を収納体数倍(2倍)していること。
- b) 輸送物の内筒(厚さ  mm)及び外筒と内筒の間の木材(厚さ  mm)の遮蔽効果を無視していること。
- c) 外筒の遮蔽厚さは板厚公差を考慮した最小厚さとしていること。
- d) 有限長の線源を1次元円筒形状にモデル化することにより、無限円筒線源でモデル化していること。

(ロ)－第D. 6表の結果より、本解析で得られた線量当量率はいずれも基準値を十分満足している。

(ロ)－第D. 6表 最高線量当量率の要約

(単位 mSv/h)

	通常の輸送条件		一般の試験条件下
	輸送物の表面	輸送物の表面から 1 mの位置	輸送物の表面
ガンマ線			
中性子			
合計			
基準値	≤ 2.0	≤ 0.1	≤ 2.0

(前回コメント反映)材料名称の統一  
説明充実も併せて実施

(ロ)－第E. 2表 各領域の原子個数密度 (個/cm<sup>3</sup>, 10<sup>24</sup>単位)

領 域	元 素	個数密度	備 考
二 酸 化 ウ ラ ン	O		燃料ペレット <sup>235</sup> U濃縮度 5.0wt%
	<sup>235</sup> U		
	<sup>238</sup> U		
ジ ル コ ニ ウ ム 合 金 *	Z r		
外筒炭素鋼板	C		
	F e		
ボ ロ ン ス テ ン レ ス 鋼 板	<sup>10</sup> B		
	<sup>11</sup> B		
	C r		
	M n		
	N i		
水	F e	容器内部空間 1.0 g/cm <sup>3</sup>	
	H		
	O		

\* 実際の仕様はジルコニウム合金 (ジルカロイ-4、MDA、ZIRLO) であるが、解析上は純度 100% のジルコニウムとして扱う。なお、他の合金成分 (スズ等) は中性子吸収効果がジルコニウムより大きいため、この取扱いは保守的である。

(前回コメント反映)材料名称の統一

(ロ)－第E. 3表 各領域の原子個数密度 (個/cm<sup>3</sup>, 10<sup>24</sup>単位)

領 域	元 素	個数密度	備 考
ポ リ エ チ レ ン 分子式 : ( C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) n	H C		
セ ル ロ ー ス 分子式 ( C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) n	H C O		
	H C		
ス テ ン レ ス 鋼 ( )	Ni Cr Fe		
炭 素 鋼 ( )	Fe		

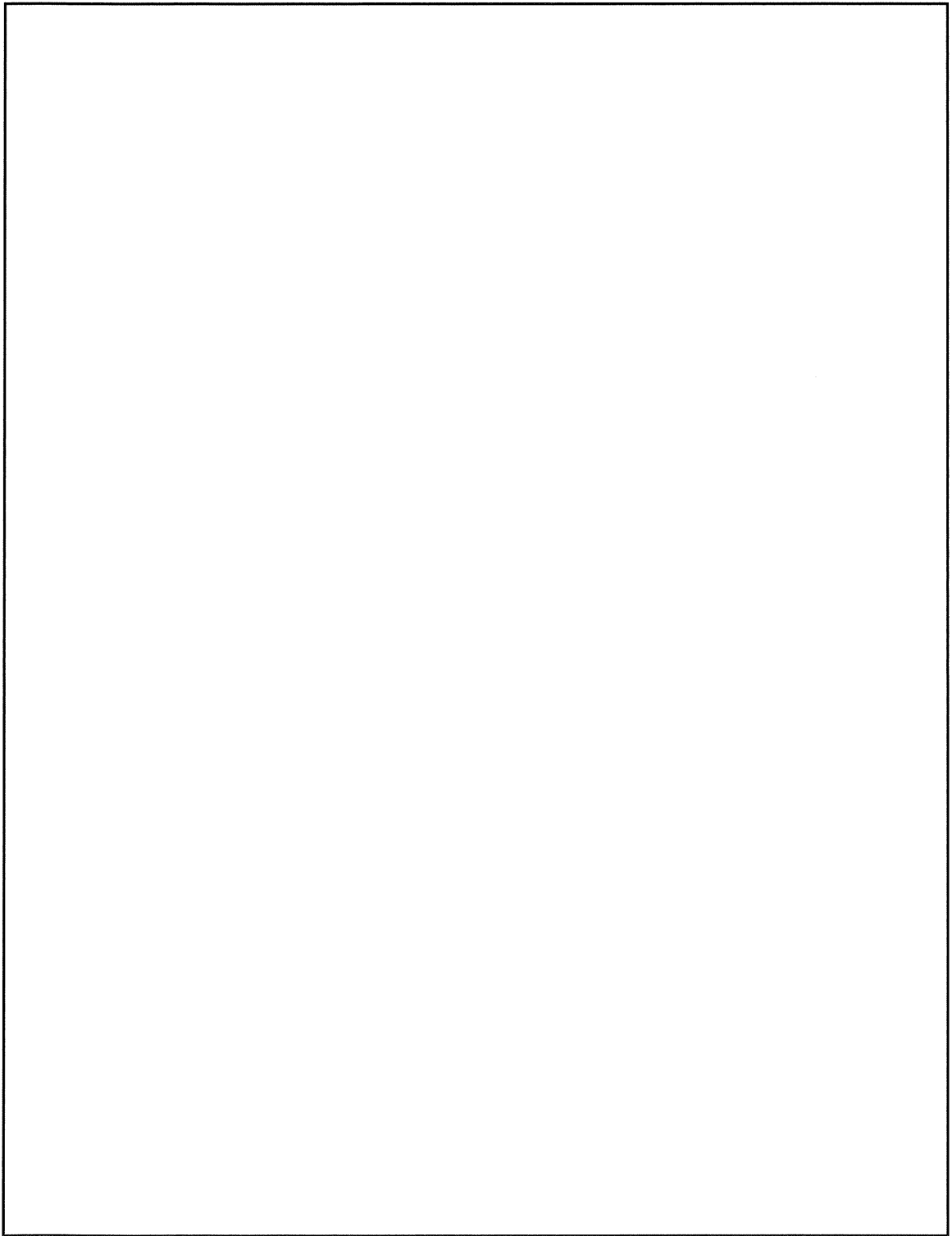


(前回コメント反映)材料名称の統一

(ロ)ー第E.4表 臨界解析条件と解析結果

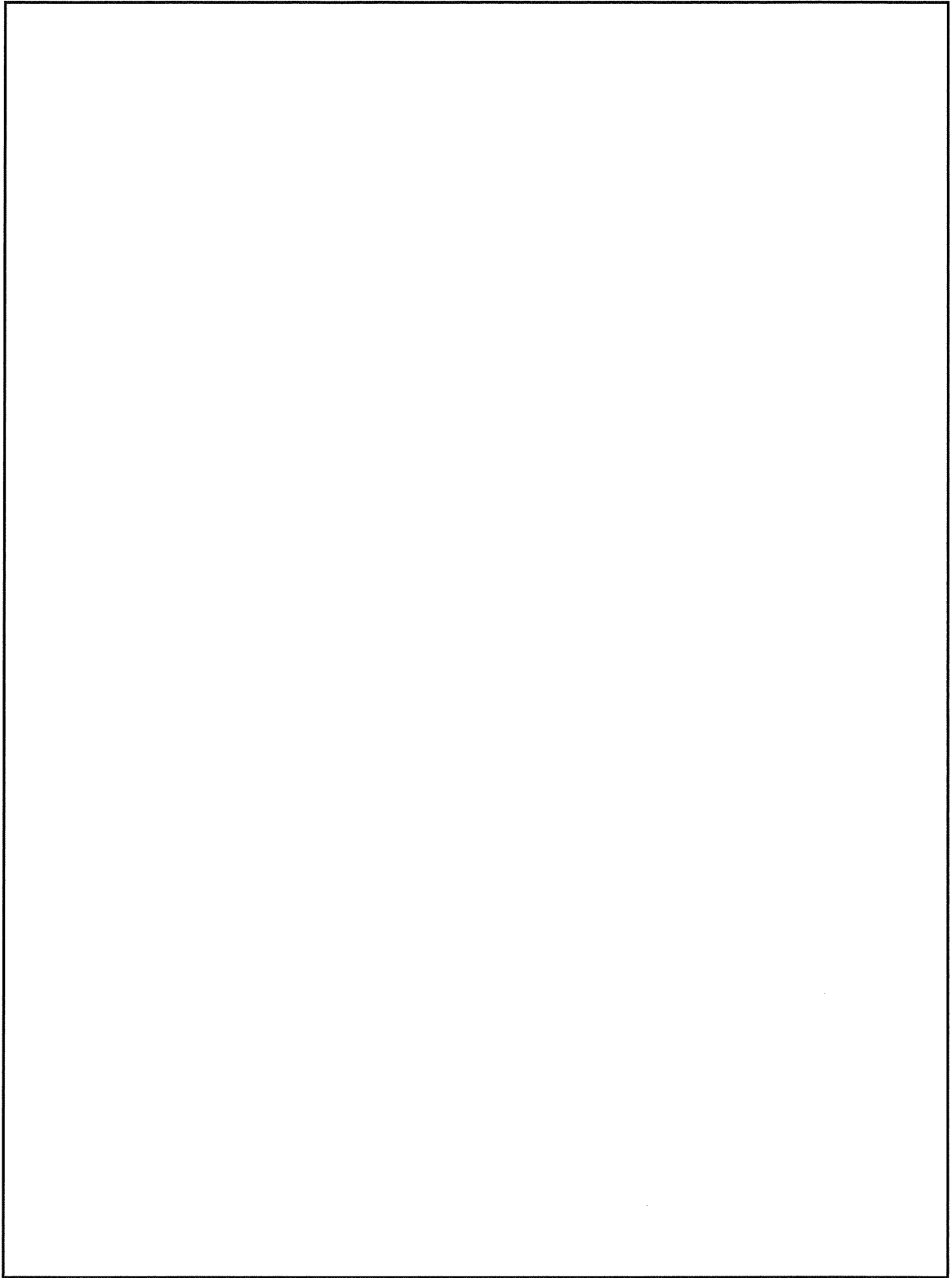
燃料集合体 型式	14×14型	15×15型	17×17型
容器個数	無限個	同 左	同 左
燃料諸元	濃縮度：5.0wt% 断面寸法： 197mm×197mm 詳しい諸元は、 (ロ)ー第E.1表を参照 2体/容器 梱包材(ポリチューブ、カードボ ード)	濃縮度：5.0wt% 断面寸法： 214mm×214mm 詳しい諸元は、 (ロ)ー第E.1表を参照 2体/容器 梱包材(ポリチューブ、カードボ ード)	同 左
構造材	ボロンステンレス鋼板 <input type="text"/> mm クランピングフレーム、支持格 子用パッド、クッション 外筒炭素鋼板	同 左	同 左
計算条件	1個の容器の完全水没時で計 算，各方向それぞれ容器を無限 個配列	同 左	同 左
結果 ( $k_{\text{eff}}+3\sigma$ )	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

(前回コメント反映)材料名称の統一



(口) - 第E. 1 図 特別の試験条件下の計算形状 (燃料領域横方向断面図)

(前回コメント反映)材料名称の統一



(口) - 第E. 2 図 特別の試験条件下の計算形状 (縦断面図)

(前回コメント反映)評価の前提条件の記載  
(2-3)容器の疲労評価の削除

(ロ)ーF 核燃料輸送物の経年変化の考慮

F.1 考慮すべき経年変化要因

本章では、本輸送物について使用を予定する期間中に想定される使用状況及びそれに伴う経年変化について考慮する。本輸送容器の使用予定期間は60年程度であり、輸送頻度は年6回程度で使用期間を通しての輸送予定回数は計360回、また1回の輸送期間(運搬)は通常数日から1ヶ月程度である。

本輸送物の使用期間中に想定される経年変化の要因としては、容器保管中や使用中における温度変化(熱)、収納物から発生する放射線、腐食等の化学変化及び繰り返し応力が生じることによる疲労が考えられる。そこで、これらの経年変化を生じさせる要因について、本輸送容器の構成部品に関して評価を実施する。

熱、放射線、化学変化の評価においては、使用予定より保守的な条件として60年の連続使用を考慮する。なお、ショックマウントは定期的な交換を行うため、化学変化の評価において使用期間である13年間を考慮する。

疲労の評価において、吊り上げ部は応力発生回数を6000回として行った。これは、以下に示す使用計画回数を保守的に設定した回数である。

使用計画回数：輸送容器使用期間×輸送回数×吊り上げ回数

ここで、

- ・輸送容器使用期間：60年
- ・輸送回数：6回/年
- ・吊り上げ回数：15回/輸送(輸送物の標準的な取扱いとして想定される吊り上げ回数に、保守・点検等を含め設定)

なお、輸送容器に密封境界を有していないため、内圧変動による疲労評価は行わない。

(前回コメント反映)材料名称の統一  
 また、輸送物の安全評価に関係しないOリングとクッションの削除

F.2 安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価

経年変化を考慮する本輸送容器の構成部品として、安全機能を担う構成部品とその使用材料を下記に示す。

輸送容器の構成部品	材料
クロスフレーム (スキン)	ボロンステンレス鋼
上蓋 (外筒, ドームプレート, 内筒, フランジ, ブラケット, 締付ボルト)	炭素鋼
下部容器 (外筒, ドームプレート, 内筒, フランジ, ショックマウント取付板, リブ)	
ショックマウントフレーム (サイドレール, クロスチューブ)	
クロスフレーム (トップフレーム, ボトムフレーム, クロスチューブ, ユニバーチャンネル)	
クロスフレーム (クランピングフレーム, 支持格子用パッド, 支持格子押さボルト, ジャッキスクリュー, 固定枠, ボトムサポート, アクスル)	
ショックマウント ( <input type="text"/> )	ゴム ( <input type="text"/> )
緩衝材	木材

クロスピンについては定期的に新しいものと取替えるため経年変化考慮の対象外である。

以上より、輸送容器において経年変化の考慮の必要性を評価する材料は下記の5つである。

- ・ボロンステンレス鋼
- ・炭素鋼
- ・ゴム (  )
- ・木材

以下に、各材料の経年変化の考慮の必要性について、熱、放射線、化学変化及び疲労の観点から示す。

(2-6) ゴムの経年変化(硬化)の安全評価への影響有無(ないことの明確化)

(2-1/2-2) 累積中性子照射量の訂正および表現(十分小さい)の見直し

(1) ボロンステンレス鋼

ボロンステンレス鋼の経年変化の考慮の必要性について、(ロ) - 第F.1表に示す。

(ロ) - 第F.1表 ボロンステンレス鋼の経年変化の考慮の必要性 (1/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
ボロンステンレス鋼	熱	使用期間中に想定されるボロンステンレス鋼の温度範囲である-20℃から 73℃((ロ)B.4.2 参照)までを考慮する。クリープの影響を受ける温度はステンレス鋼の融点(K)の三分の一である 280℃であり、運搬中に予想される最高温度(73℃)と比較して十分に高いことから、仮にボロンステンレス鋼を使用期間中、継続して上記温度環境下に置いた場合でも、組織変化、クリープ、割れ等の経年変化の影響は受けない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し
	放射線	収納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、ステンレス鋼の顕著な機械的特性変化を与えるとされる中性子照射量 $10^{17}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以上 <sup>(1)</sup> に対し、60年間の累積照射量は <input type="text"/> n/cm <sup>2</sup> 以下で十分小さい。また、含有されるボロン-10の減損率は上記60年間の累積照射量を受けても初期の <input type="text"/> 以下でごく微量である。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	ボロンステンレス鋼は材料の表面に不動態膜を形成することから腐食は発生しにくい。また、定期自主検査の外観検査で、腐食が確認された場合は補修又は交換する。このため、使用期間内に腐食等の経年変化の影響は受けない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し

(ロ) ー第 F.1 表 ボロステンレス鋼の経年変化の考慮の必要性 (2/2)

材料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化 の考慮の 必要性
ボロステン レス 鋼	疲労	構造部材として用いられていないため発生応力はごく小さい。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し

(前回コメント反映)材料名称の統一  
 (2-1/2-2) 累積中性子照射量の訂正および表現(十分小さい)の見直し

(2) 炭素鋼

炭素鋼の経年変化の考慮の必要性について、(ロ) - 第 F. 2 表に示す。

(ロ) - 第 F. 2 表 炭素鋼の経年変化の考慮の必要性 (1/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
炭素鋼	熱	<p>使用期間中に想定される炭素鋼の温度範囲である-20℃から73℃((ロ)B. 4. 2 参照)までを考慮する。クリープの影響を受ける温度は炭素鋼の融点(K)の三分の一である300℃であり、運搬中に予想される最高温度(73℃)と比較して十分に高いことから、仮に炭素鋼を使用期間中、継続して上記温度環境下に置いた場合でも、使用期間に想定される温度範囲においては組織変化、クリープ、割れ等の経年変化の影響は受けない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	放射線	<p>収納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、炭素鋼の顕著な機械的特性変化を与えるとされる中性子照射量 <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> 程度以上<sup>(2)</sup>に対し、60年間の累積照射量は <input type="text"/> n/cm<sup>2</sup> 以下で十分小さい。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	化学	<p>炭素鋼は防錆処置として塗装を施し、ボルトに用いる炭素鋼と合金鋼には防錆潤滑剤を塗布して使用していることから、腐食は発生しにくい。また、定期自主検査の外観検査で異常が確認された場合には補修又は交換する。さらに、発送前検査で外観に異常がないことを確認している。このため、使用期間内に腐食等の経年変化の影響は受けない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し



## (2-3)容器の疲労評価の削除

(ロ) ー第 F.2 表 炭素鋼の経年変化の考慮の必要性 (2/2)

材料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化 の考慮の 必要性
炭素鋼	疲労	外筒、ブラケット及び締付ボルトにおいて、吊上げ荷重より繰り返し応力が発生するため、経年変化についての考慮が必要となる。 吊上げ荷重により外筒、ブラケット及び締付ボルトに発生する繰り返し応力を、F.1 で示したとおり保守側に設定した使用回数に基づいて疲労評価を行う ((ロ)A.10.9 参照)。	有り

(2-1/2-2) 累積中性子照射量の訂正および表現（十分小さい）の見直し  
 (2-5) ゴムの応力緩和表現の見直し  
 (2-6) ゴムの経年変化(硬化)の安全評価への影響有無(ないことの明確化)  
 また、輸送物の安全評価に関係しないOリングとクッションの削除

(3) ゴム (  )

ゴム (  ) の経年変化の考慮の必要性について、(ロ) - 第F.3表に示す。

(ロ) - 第F.3表 ゴム (  ) の経年変化の考慮の必要性(1/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
ゴム ( <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	熱	使用期間中に想定されるゴム ( <input type="text"/> ) の温度範囲である-20℃から 73℃((ロ)B.4.2 参照)までを考慮する。運搬中に予想される温度は A.4.2 に示す使用可能温度範囲で応力緩和は生ずるが、ひび割れ等の熱に起因する劣化は生じない。なお、応力緩和により防振機構部の保持位置が低くなるが、臨界・遮蔽評価の対象である容器上方向への落下では容器内面から遠くなる方向の移動で現行の評価条件に包絡されるので安全機能への影響はない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し
	放射線	収納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、ゴムが使用可能とされる中性子照射量 $10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以上 <sup>(3)</sup> に対し、交換せずに 60 年間使用しても累積照射量は <input type="text"/> n/cm <sup>2</sup> 以下で十分小さい。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し

(2-6)ゴムの経年変化(硬化)の安全評価への影響有無(ないことの明確化)

(ロ) - 第 F.3 表 ゴム (  ) の経年変化の考慮の必要性 (2/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
ゴム ( <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	化学	金属材料と異なり腐食等は発生しないが、空気中に含まれるオゾン等により酸化 <sup>(4)</sup> し、若干硬化することが予想される。 F.1 に述べた通りショックマウントは定期交換を前提とし、 F.4.2 項に述べた通り使用期間中における落下評価に対するショックマウントの硬化影響は軽微で安全評価への考慮は必要ないことを確認している。	有り
	疲労	定期的な点検により劣化状況を確認するとともに交換することで疲労による経年変化を防止する。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し

(前回コメント反映)材料名称の統一

(4) 木材

木材の経年変化の考慮の必要性について、(ロ) - 第 F.4 表に示す。

(ロ) - 第 F.4 表 木材の経年変化の考慮の必要性 (1/2)

材料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化 の考慮の 必要性
木材	熱	<p>使用期間中に想定される木材の温度範囲は、熱解析で算出した容器の温度と同等の 73℃((ロ)B.4.2 参照)までを考慮する。高温環境下では熱による強度低下が考えられ、木材温度が 200℃に達すると木材の熱分解が進む<sup>(5)</sup>との文献が確認できたものの、直接参照できる文献は乏しい状況にある。一方で、緩衝材として木材が広く使用されていることを踏まえ、現在国内事業者が使用又は使用予定の輸送容器について、これまでの実輸送時の条件をもとに収納物による設計上の最大入熱を考慮した輸送容器の緩衝材の平均温度を評価した結果、約 40～70℃程度であること、使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の圧潰強度及び密度測定の結果、木材の衝撃吸収性能は健全であり性能劣化はなかった<sup>(注)</sup>こと、また本輸送物の収納物が発熱しないことから、これまでの実績と同様の使用環境であれば、木材の熱的劣化は生じない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(注) 参考資料：第 12 回輸送容器及び使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器に関する審査会合  
(令和 4 年 4 月 25 日) 資料 1 別紙「緩衝材 (木材) の熱的劣化について」

(2-1/2-2) 累積中性子照射量の訂正および表現（十分小さい）の見直し  
 容器の内圧に関する記述も安全評価に関係しないため削除

(ロ) - 第 F.4 表 木材の経年変化の考慮の必要性 (2/2)

材料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化 の考慮の 必要性
木材	放射線	収納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、 木材の顕著な機械的特性変化を与えるとされる中性子照射量 $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以上 <sup>(6)</sup> に対し、60年間の累積照射量は [ ] n/cm <sup>2</sup> 以下で十分小さい。以上のことから技術基準へ の適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	緩衝材の充填空間は炭素鋼製の外筒や内筒等に覆われた閉鎖 環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐朽による 経年変化の影響は受けない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化 の考慮は必要ない。	無し
	疲労	木材の使用箇所には、取扱いに起因する応力が生じないた め、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから技術 基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し

## (2-7) 「経年変化の安全解析への考慮の必要性」の説明に特化

### F.3 安全解析における経年変化の考慮内容

前節に示した通り、本輸送物に係る安全機能を担う構成部品の材料を対象に、経年変化の考慮の必要性について評価を行った。

ボロステンレス鋼、木材については、技術基準への適合性を評価する上で使用期間中の経年変化を考慮する必要がない。またゴムについては定期交換を踏まえ、技術基準への適合性を評価する上で使用期間中の経年変化を考慮する必要がない。

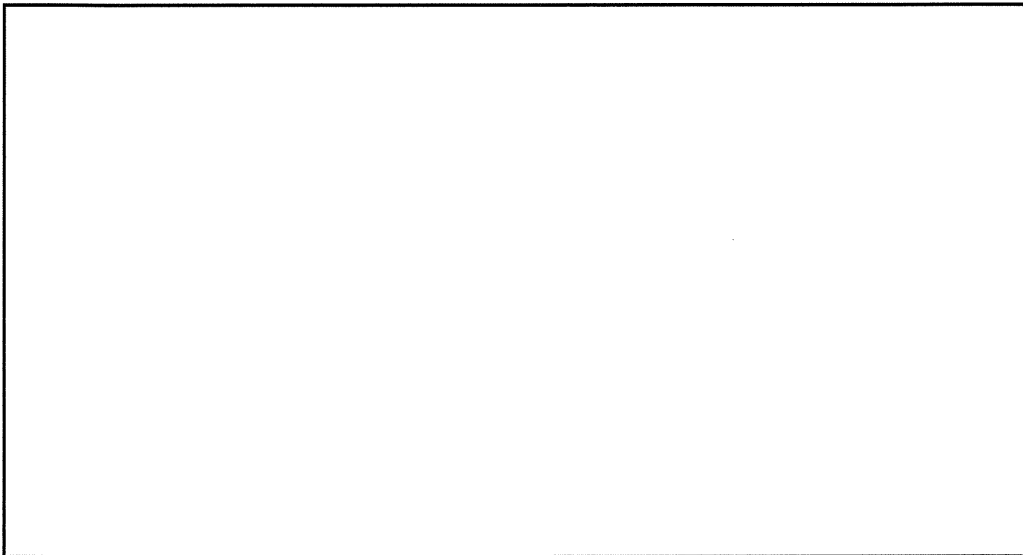
炭素鋼については熱、放射線、化学変化において、技術基準への適合性を評価する上で使用期間中の経年変化を考慮する必要がない。ただし、炭素鋼製の外筒、ブラケット及び締付ボルトについては、吊り上げによって繰り返し応力が発生するため、疲労による経年変化を考慮することとする

(2-6)ゴムの経年変化(硬化)の安全評価への影響有無(ないことの明確化)  
(口章Aより移動)

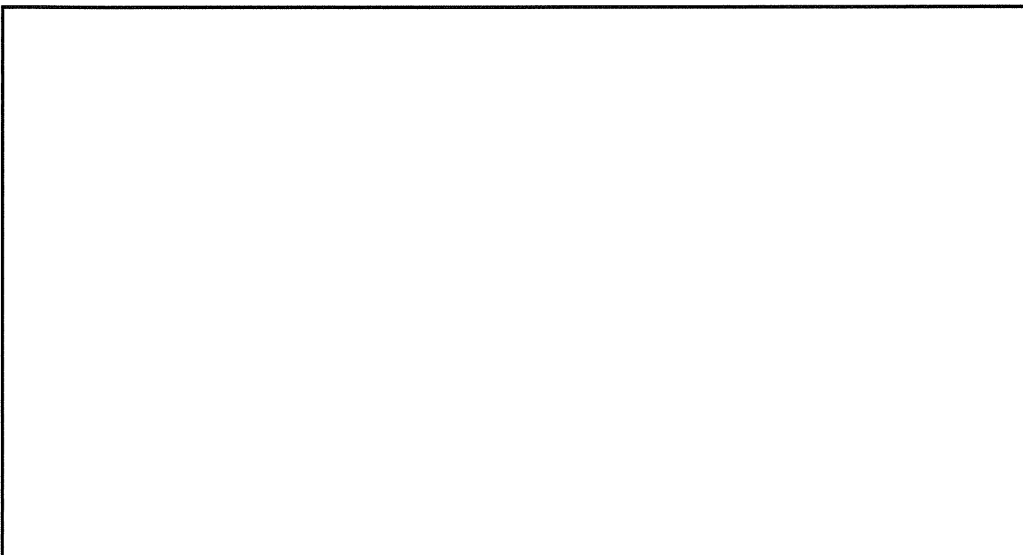
F. 4. 2 ショックマウントの機械的性質の変化が及ぼす影響

本項では、F. 2 項に関連し、経年変化要因としてショックマウントのゴムの硬化の落下解析への影響評価を行い、安全評価に対する経年変化の考慮の必要性について検討する。

ショックマウントの経年劣化に伴うばね定数の変化について(口)―第F. 1 図及び(口)―第F. 2 図に示す。(口)―第F. 1 図及び(口)―第F. 2 図に示すとおり、ショックマウントを13年以上使用したものは初期値に対してばね定数が、引張方向で最大約□%程度、せん断方向で最大約□%程度硬化する。



(口)―第F. 1 図 経年劣化に伴うショックマウントのばね定数変化 (引張方向)



(口)―第F. 2 図 経年劣化に伴うショックマウントのばね定数変化 (せん断方向)

(2-6)ゴムの経年変化(硬化)の安全評価への影響有無(ないことの明確化)  
(ロ章Aより移動)

ここで、ショックマウントのばね定数が変化したことの伴う落下解析への影響評価を実施する。ロ章A. 10. 5項に示す解析条件下で、ショックマウントのばね定数変化を考慮し、「SHOCK」コードを使用して収納物や容器本体に生ずる加速度、変形量等を算出する。

解析に使用するばね定数は、(ロ)－第F. 1図及び(ロ)－第F. 2図に示す変化率を上回るよう引張方向には□倍、せん断方向には□倍を(ロ)－第A. 38表に示すばね定数に乗じた値とする。落下ケースは構造評価結果が最も厳しい水平落下を選択する。

(ロ)－第F. 4表に解析に使用したショックマウントのばね定数を示す。

(ロ)－第F. 4表 影響評価解析に使用したショックマウントのばね定数

姿勢 ばね	0° 下向水平落下	90° 下向水平落下	180° 下向水平落下
(d)			

評価結果を(ロ)－第F. 5表に示す。表には、経年前の結果 ((ロ)－第A. 39表と同じ)も記載した。



(2-6)ゴムの経年変化(硬化)の安全評価への影響有無(ないことの明確化)  
(口章Aより移動)

(口)－第F. 5表 ショックマウントの硬化を考慮した落下解析結果

対象	項目		姿勢落下		0°方向下 向水平落下	90°方向下向 水平落下	180°方向下向 水平落下
			外 殻	防振構造部			
経年前	1.2m 落下	加速度 (×g)	外 殻		[解析結果の表]		
			防振構造部				
		変形量 (mm)	外 殻 外 側				
			防振構造部 (注 1, 2)				
	9 m 落下 (注 3)	加速度 (×g)	外 殻				
			防振構造部				
変形量 (mm)		外 殻 外 側					
		防振構造部 (注 1)					
経年後	1.2m 落下	加速度 (×g)	外 殻				
			防振構造部				
		変形量 (mm)	外 殻 外 側				
			防振構造部 (注 1, 2)				
	9 m 落下 (注 3)	加速度 (×g)	外 殻				
			防振構造部				
変形量 (mm)		外 殻 外 側					
		防振構造部 (注 1)					

注 1 防振構造部の変形量は防振構造部の移動により外殻内面に衝突した時の外殻の変形量を示している。

注 2 防振構造部の変形量 0 mm は防振構造部と外殻とが衝突しないことを意味する。

注 3 (1) 1.2 m落下の変形を考慮し、9 m落下を評価している。

(2) 変形量 ( ) 内は健全時からの総変形量を示している。

## (2-6)ゴムの経年変化(硬化)の安全評価への影響有無(ないことの明確化)

ショックマウントのゴムの硬化の落下解析への影響評価結果に基づき、安全評価に対する経年変化の考慮の必要性について以下検討を行い、安全評価に経年変化の影響を考慮する必要がないことを確認した。

### (1)一般の試験条件

表面の線量当量率評価のための遮蔽解析では、落下時の瞬間的な防振構造部位置の移動や落下による容器外側の変形量を考慮した評価を行っている。ロ章Eに示す通り、一般の試験条件では最も厳しい方位となる $0^\circ$ 方向下向水平落下を対象に容器表面の線量当量率を評価し、基準に対して十分小さく、通常輸送時の線量当量率と比較して著しい線量当量率の増加がないことを確認している。経年後の集合体の移動量及び容器変形量は経年前と比較して小さくなり遮蔽評価への影響は無視できるので、安全評価に影響を考慮する必要はない。

なお、放射性物質の漏洩については、後述の通り密封境界である燃料棒被覆管の健全性が一般の試験条件より大きな加速度である核燃料輸送物の特別の試験条件においても影響されないので、安全評価に影響を考慮する必要はない。

### (2)核燃料輸送物の特別の試験条件

特別の試験においては、防振構造部の最大の加速度が、GからGに増加する。ただし、その影響は約1%とわずかで、最も余裕率の小さい燃料棒被覆管(余裕率)においても余裕率への影響は限られ、健全性は影響されないため臨界評価への影響はない。

また、臨界評価では、落下時の瞬間的な防振構造部位置の移動や容器の変形量を考慮して解析モデルを構築している。変形量は、 $180^\circ$ 方向下向落下の容器外側が1mm増加するものの、臨界評価は最も厳しい方位である $0^\circ$ 方向下向落下を対象としているため、影響はない。

別表 外運搬規則及び外運搬告示に定める技術基準への適合性の評価  
 A型核分裂性輸送物の規則案に対する適合性の比較

規則の項目	告示の項目	基準	説 明	申請書記載 対応項目	備 考
第3条 第3項		核燃料輸送物の経年変化を考慮した上で、技術上の基準に適合するものでなければならぬ。	<p>本輸送容器的使用予定期間は60年であり、使用期間を通しての輸送予定回数(計360回、1回の輸送期間は通常数日から1ヶ月程度を想定している。取納物が発熱しないため、太陽放射熱による温度上昇を保守的に定常状態として簡易計算で評価した本輸送容器的最高温度は73℃である。輸送物の安全機能を担う構成部品(ボロンステンレス鋼、炭素鋼、ゴム( )、木材)を対象に、技術上の基準に適合性を確認する上で考慮が必要となる経年変化に係り、熱、放射線、化学変化及び疲労の観点からその影響について評価した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ボロンステンレス鋼、炭素鋼及びゴムについては60年間連続して構成部品等が使用中に想定される最高温度であるとした保守側の条件の下で、組織変化、クリープ、割れ、熱分解は発生しない。また、木材については、使用済燃料輸送容器的緩衝体木材の衝撃吸収性能が維持されていた実績、及び、本輸送物の取納物の発熱量が無いことから、熱による経年変化の影響は受けない。</li> <li>取納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、60年間の累積照射量が顕著な機械的特性変化を与えたとされるボロン-10の減損率はごく小さく、またボロンステンレス鋼に含有されるボロン-10の減損率はごく微量であることから、放射線による経年変化の影響は受けない。</li> <li>ボロンステンレス鋼については材料の表面に不動陰障を形成し、炭素鋼は防錆処置として塗装を施し、ボルトに用いる炭素鋼には防錆潤滑剤を塗布して使用していることから腐食は発生しにくく、定期自主検査の外観検査で異常がないことを確認している。木材はステンレス鋼製のカバープレートに覆われた閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐朽による経年変化の影響は受けない。ゴムについては空気中に含まれるオゾン等により酸化し硬化するが、ショックマウント( )は限られており、安全評価に経年変化の影響を考慮する必要がないことを確認している。</li> <li>炭素鋼については、適用先の外筒、ブラケット及び締付ボルトに繰り返し応力が発生することから経年変化の考慮が必要となる。使用予定より保守的な条件として、使用期間中に吊り上げによる応力が6000回発生するとし、疲労評価を実施し、規則に定める技術基準に適合していることを確認した。また、ボロンステンレス鋼については構造材として用いられていないこと、木材については使用箇所である緩衝材部が取扱いに起因する応力は生じないことから疲労による経年変化の考慮は必要ない。ゴムについては定期的な点検により劣化状況を確認するとともに交換することで疲労による経年変化を防止するので疲労による経年変化の考慮は必要ない。</li> </ul> <p>以上のことから規則に定める技術基準の適合に影響しない。</p>	(F)-F (F)-A.10	