

令和 2 年 10 月 5 日
三菱原子燃料株式会社

核燃料輸送物設計承認申請に関するコメントへの回答
(MX-6P 型核燃料輸送物)

令和 2 年 7 月 20 日面談及び 8 月 6 日審査会合におけるコメント

- (No. 1) 輸送容器の吊上げ時の（トラニオン及びハンドリングベルトが取り付けられた）本体の健全性についても説明すること。
- (No. 2) 放射性物質の漏えいがないことの説明では、密封装置の構造健全性に加えて、開口部となる部位の変位についても説明すること。
- (No. 3) 臨界解析で考慮を要する形状の変化、臨界解析に影響を与える損傷について、具体的に説明すること。

回答

(コメント No. 1)

輸送容器の吊上げ時の本体の健全性について、定量的な説明を安全解析書の口章 A 構造解析の付属書類-6 として追加します（別紙 1）。また、それに伴い別紙 2 のとおり安全解析書の本文を変更します。

(コメント No. 2)

開口部となる部位の変位について、一般の試験条件の熱的試験及び自由落下における蓋板ガスケット部の口開き変形の定量的な説明を、安全解析書の口章 A 構造解析の付属書類-7 として追加します（別紙 3）。また、それに伴い別紙 4（一部コメント No. 3 の反映を含む）のとおり安全解析書の本文を変更します。

なお、A 型輸送物に係る技術上の基準の「周囲の圧力を 60kPa とした場合に、放射性物質の漏えいがないこと」については、一般の試験条件における熱的試験で包含して評価しています。

(コメント No. 3)

輸送物の損傷状態と臨界解析モデルでの考慮についての説明資料を安全解析書の口章 E 臨界解析の付属書類-1 として追加し（別紙 5）、内筒とアルミスペーサーの変形の影響を評価した資料を付属書類-5 として追加します（別紙 6）。また、別紙 7 のとおり、口章 A 構造解析及び口章 B 熱解析においては臨界解析に影響する形状の変化等の記述にとどめ、損傷状態の臨界解析モデルでの考慮については口章 E 臨界解析で説明するよう本文を修正します。

なお、口章 A 及び口章 E に付属書類を追加したため、既存の付属書類の番号に以下変更が生じます。

(現行)		(修正後)
A. 10. 6 付属書類-6	→	A. 10. 8 付属書類-8
E. 7. 1 付属書類-1	→	E. 7. 2 付属書類-2
E. 7. 2 付属書類-2	→	E. 7. 3 付属書類-3
E. 7. 3 付属書類-3	→	E. 7. 4 付属書類-4
E. 7. 4 付属書類-4	→	E. 7. 6 付属書類-6

以上

A. 10.6 付属書類-6 吊上げ操作における本体の強度

トラニオンあるいはハンドリングベルトによる吊上げ操作において、これら吊上装置周辺を含む本体側部品に発生する応力を求め、操作時における荷重に対して本体が十分な強度を有していることを確認する。

(1) トラニオンによる吊上げ操作時

a. 解析モデル

解析モデルは、A. 4.5 固縛装置の評価に用いたモデル（(□)－第A. 16 図参照）に上部フランジ及び底板それぞれにトラニオンを取付けるブロック（「トラニオン座」と呼ぶ）の部分を追加している。

解析モデルの要素分割図を(□)－第A. 付 6.1 図に示す。

b. 荷重条件及び境界条件

(a) 垂直吊り

i. 荷重条件

解析モデルの質量は輸送物の全体質量（19.5 トン）とし、負荷係数 3 を乗じた重力加速度を作用させる。併せて内部圧力[] MPa を負荷する。

バスケットと収納物を合わせた内容物の質量（[] トン/容器）は、底板の内面に均等に付加する。

ii. 境界条件

トラニオンはボルトによりトラニオン座に強固に固定されるため、前部のトラニオン座にトラニオンに見立てた剛体のシェルを配し、その中心の節点に対して重力加速度方向の変位を拘束する。

(b) 水平吊り

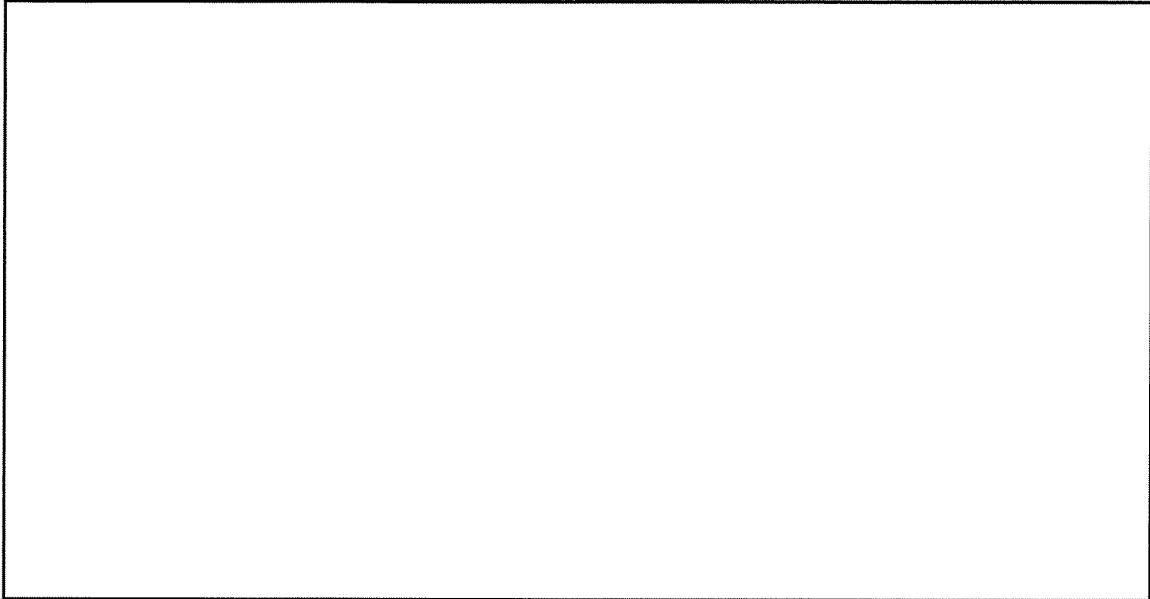
i. 荷重条件

解析モデルの質量は輸送物の全体質量（19.5 トン）とし、負荷係数 3 を乗じた重力加速度を作用させる。併せて内部圧力[] MPa を負荷する。

内容物の質量は、A. 4.5 固縛装置の解析モデルと同じく、内容物の質量を考慮した密度を内筒に与える。

ii. 境界条件

前部と後部のトラニオン座に、垂直吊りのモデルと同様にトラニオンに見立てた剛体のシェルを配し、その中心の節点に対して重力加速度方向の変位を拘束する。



(□)－第A. 付 6.1 図 要素分割図

c. 解析結果

(a) 垂直吊り

本体の変形図及び本体部品に発生したトレスカの応力分布図を(□)－第A. 付 6.2 図及び(□)－第A. 付 6.3 図にそれぞれ示す。

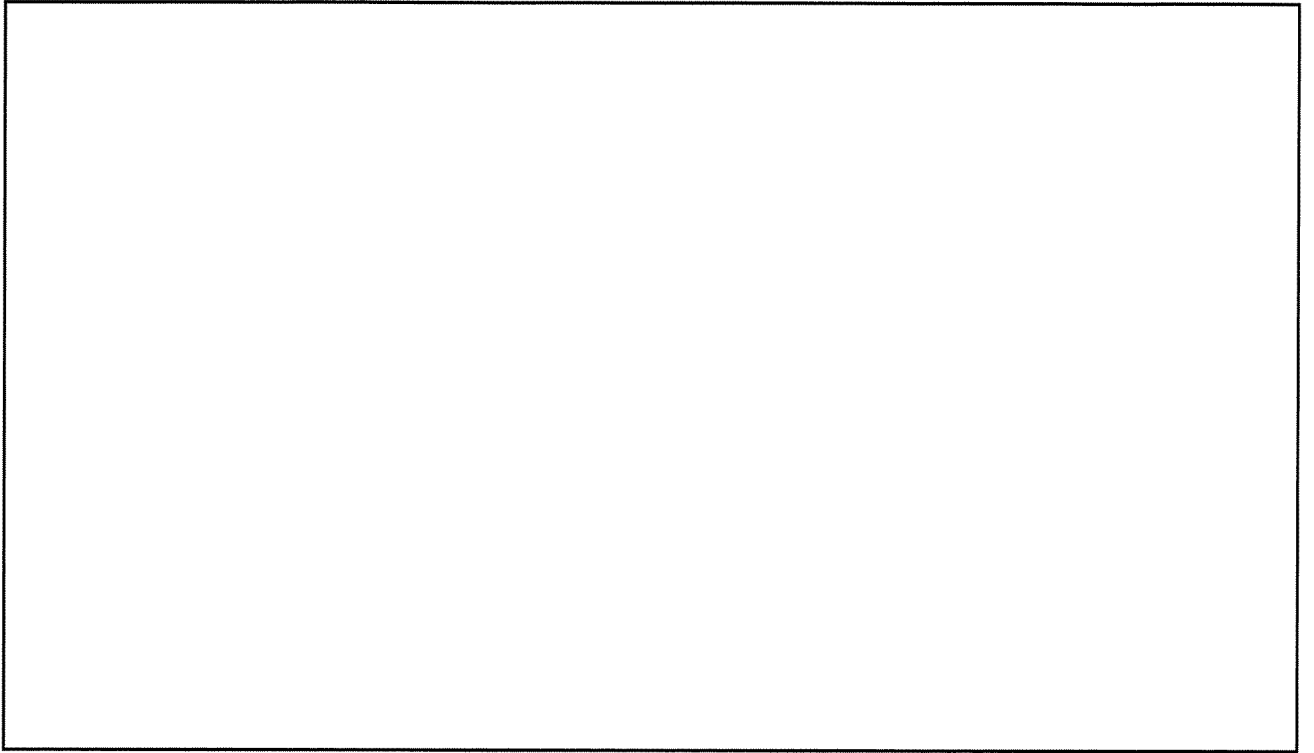
また、本体部品に発生した最大応力を(□)－第A. 付 6.1 表に示す。同表に示すように、本体部品に発生した応力は最大で□MPa 以下であり、各部材の設計降伏応力を十分に下回っている。

(b) 水平吊り

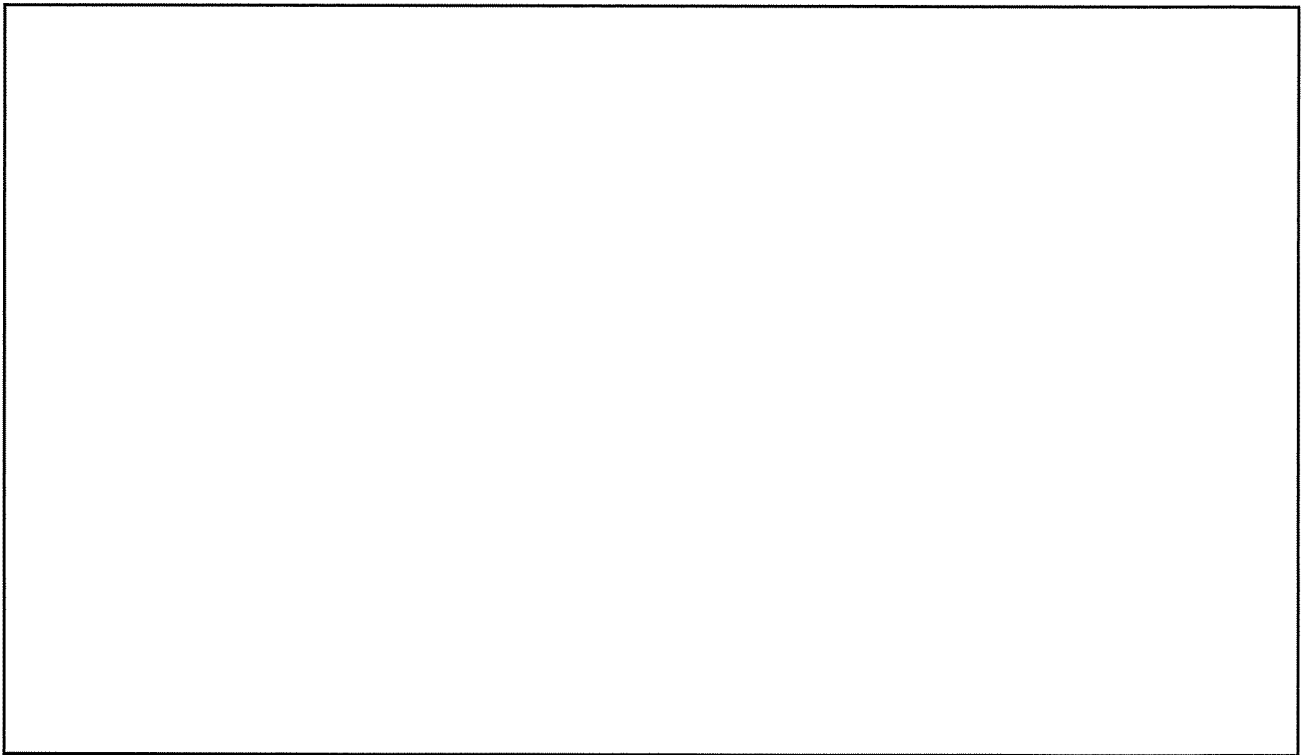
本体の変形図及び本体部品に発生したトレスカの応力分布図を(□)－第A. 付 6.4 図及び(□)－第A. 付 6.5 図にそれぞれに示す。

また、本体部品に発生した最大応力を(□)－第A. 付 6.2 表に示す。同表に示すように、本体部品に発生した応力は最大で□MPa 以下であり、各部材の設計降伏応力を十分に下回っている。

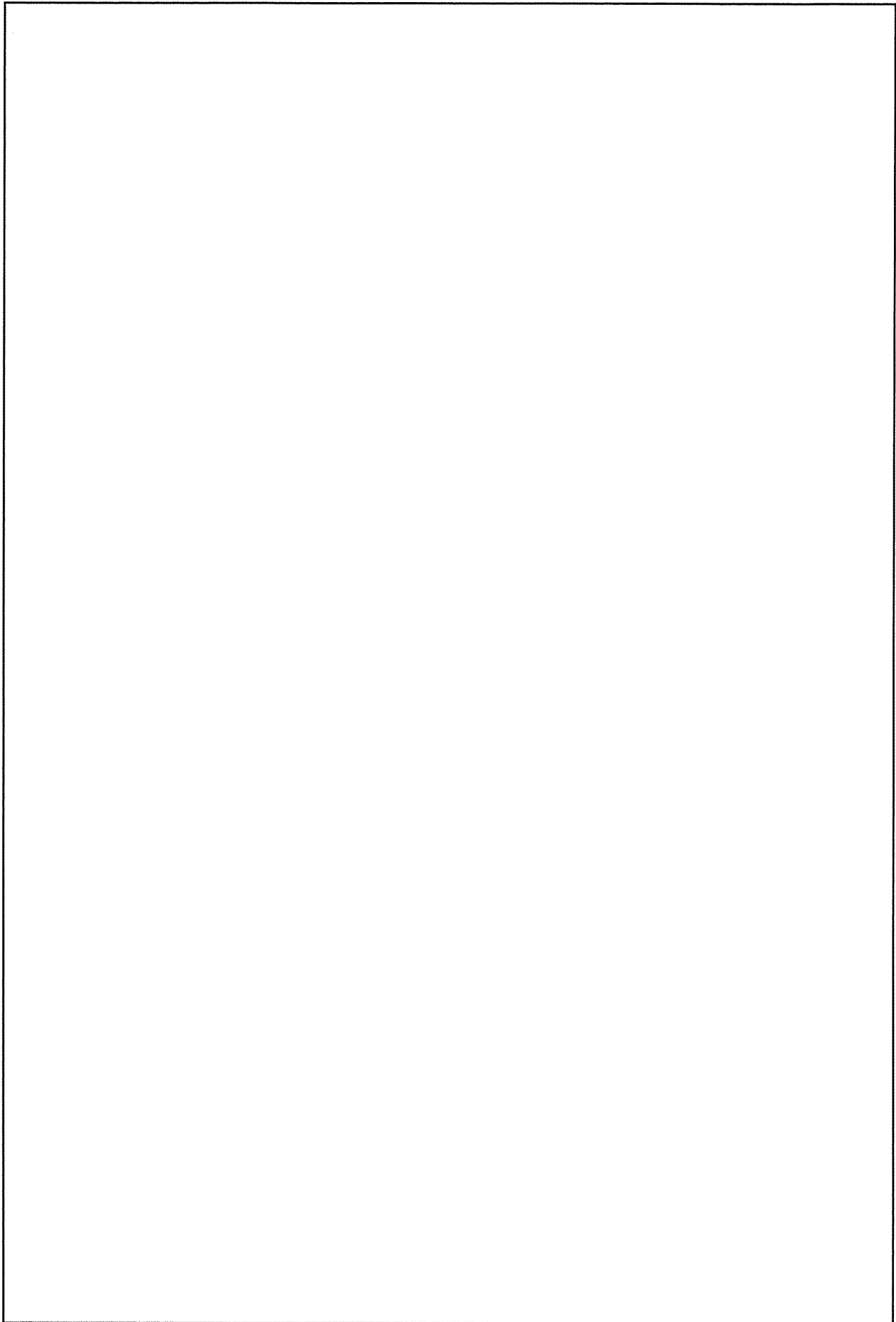
以上の結果から、トラニオンによる吊上げ操作における荷重に対して本体は十分な強度を有している。



(□)－第A. 付 6.2 図 解析結果 / 垂直吊り (変形図)

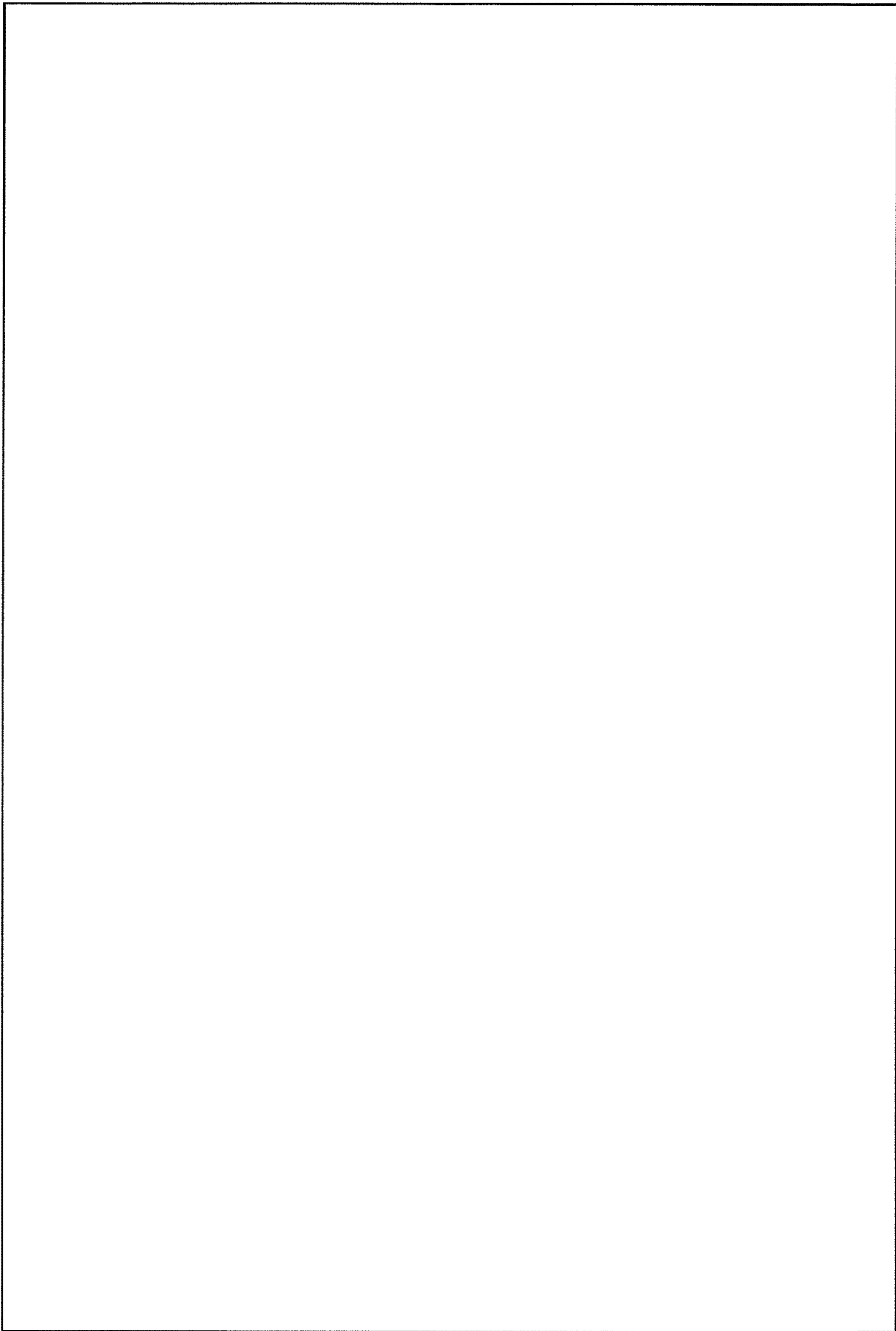


(□)－第A. 付 6.3 図 解析結果 / 垂直吊り (応力分布図<トレスカの応力強さ>) (1/2)



(□) - 第A. 付 6.3 図 解析結果 / 垂直吊り (応力分布図<トレスカの応力強さ>) (2/2)

(ア) ー 第 A. 付 6.5 図 解析結果 / 水平吊り (応力分布図<トレスカの応力強さ>) (1/2)



(ア)－第A. 付 6.5 図 解析結果 / 水平吊り (応力分布図<トレスカの応力強さ>) (2/2)

(□)－第A. 付 6.1 表 トラニオンによる垂直吊りにおいて本体部品に発生した最大応力

部品	応力強さ (MPa)	設計降伏応力 (MPa)
上部フランジ		
内筒		
胴ガセット		
胴外板		

(□)－第A. 付 6.2 表 トラニオンによる水平吊りにおいて本体部品に発生した最大応力

部品	応力強さ (MPa)	設計降伏応力 (MPa)
上部フランジ		
底板		
内筒		
胴ガセット		
胴外板		

(2) ハンドリングベルトによる吊上げ操作時

a. 解析モデル

解析モデルは、A. 4.5 固縛装置のモデル ((□)－第A. 16 図参照) を用いる。

b. 荷重条件及び境界条件

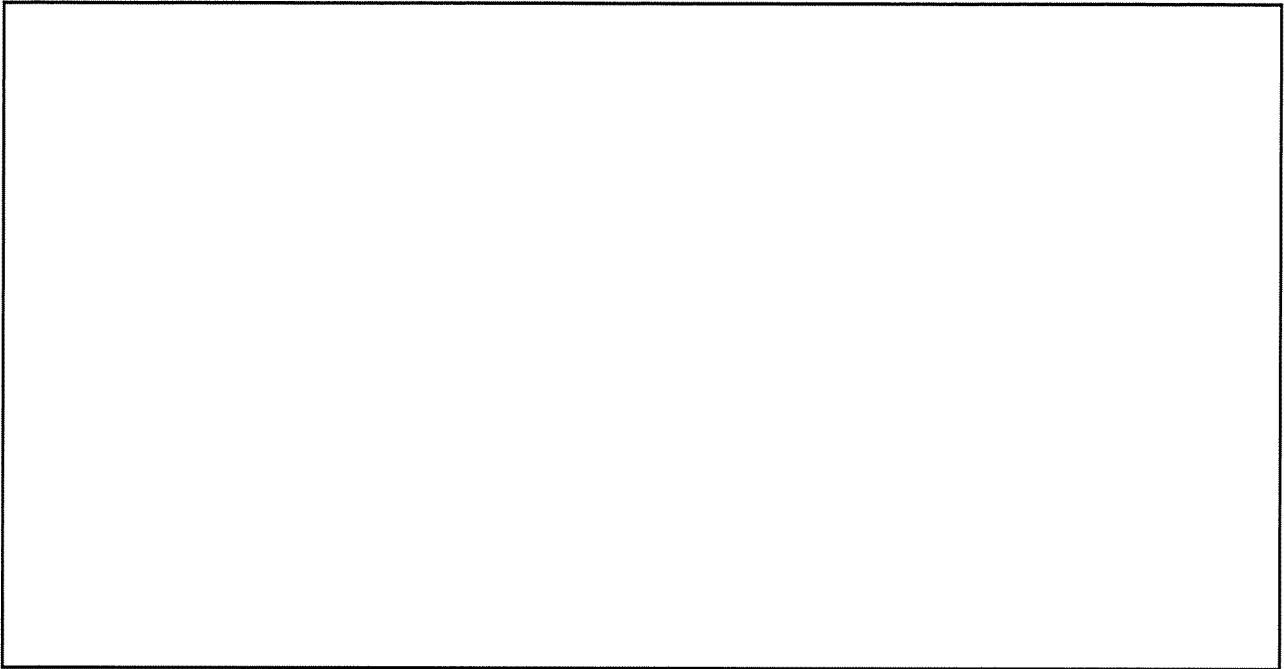
(a) 荷重条件

吊上げ操作時の荷重条件として、負荷係数 3 を乗じた重力加速度を解析モデル全体に作用させる。併せて内部圧力 MPa を負荷する。

(b) 境界条件

ハンドリングベルトは胴部を全周にわたって固定するように取付けられることから、取付け部位の胴部の半周について半径方向の変位を拘束する。

以上の荷重及び境界条件を(□)－第A. 付 6.6 図に示す。



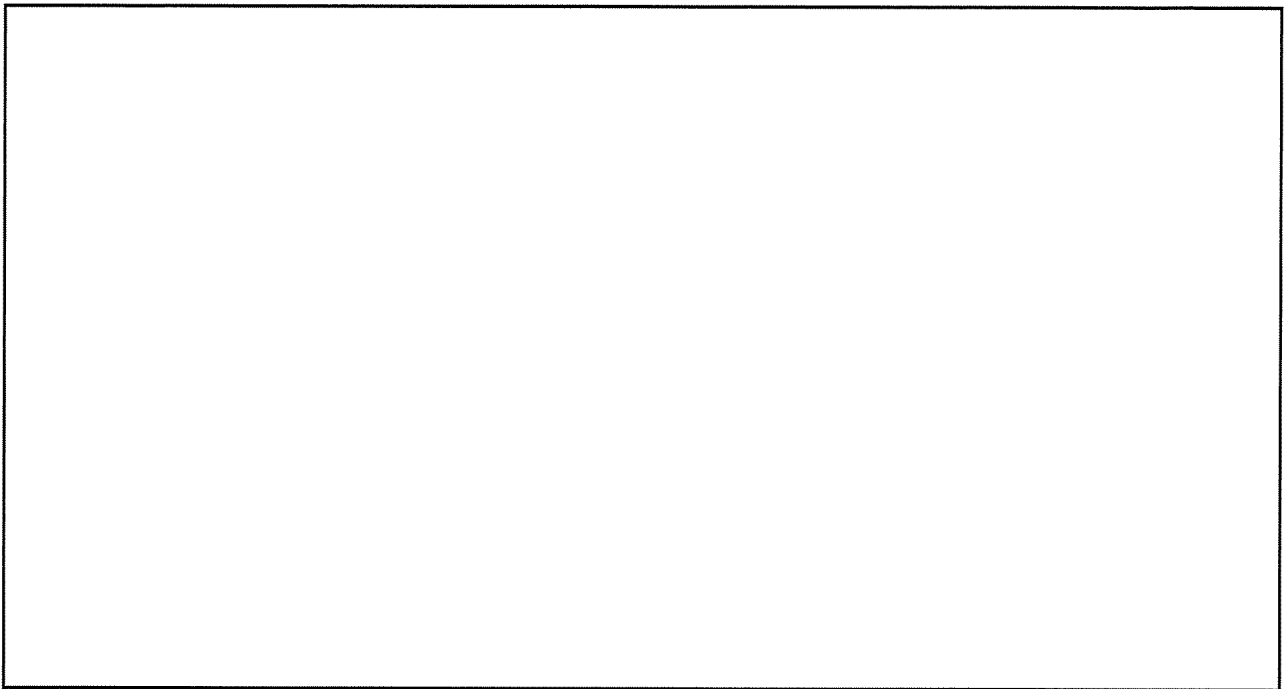
(□)－第A. 付 6. 6 図 荷重及び境界条件

c. 解析結果

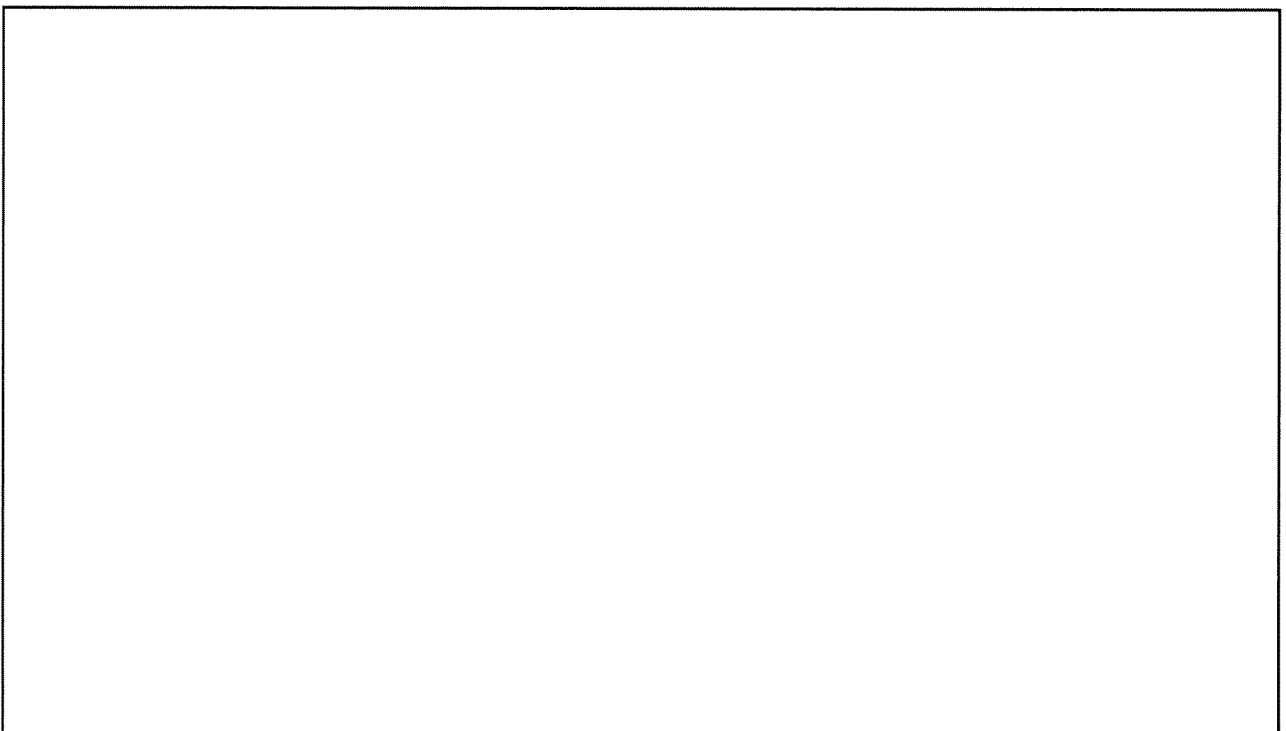
本体の変形図及びハンドリングベルトを取付けた胴部の部品に発生したトレスカの応力分布図を(□)－第A. 付 6. 7 図及び(□)－第A. 付 6. 8 図にそれぞれ示す

また、本体部品に発生した最大応力を(□)－第A. 付 6. 3 表に示す。同表に示すように、本体部品に発生した応力は最大で□MPa 以下であり、各部材の設計降伏応力を十分に下回っている。

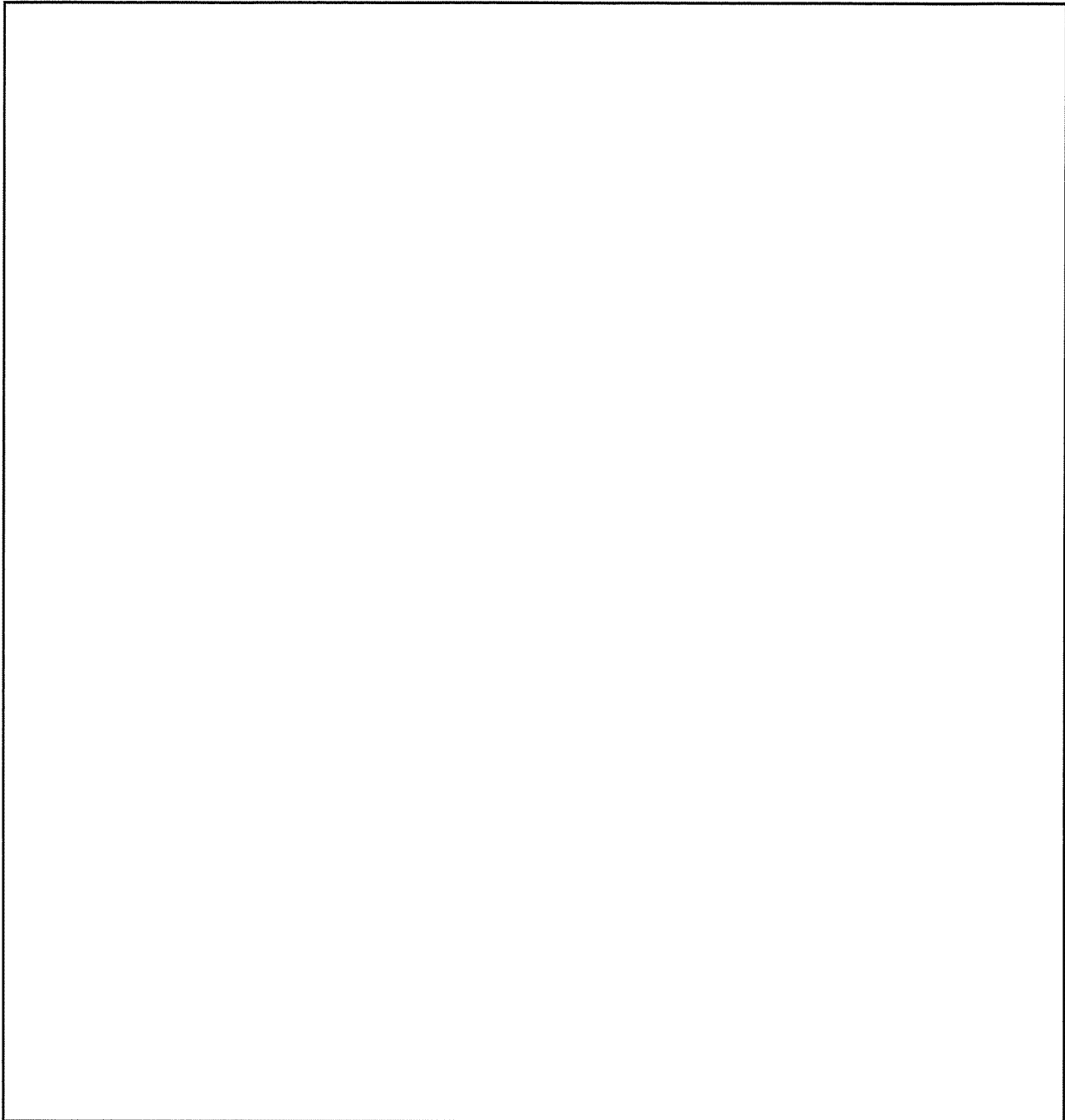
したがって、ハンドリングベルトによる吊上げ操作における荷重に対して本体は十分な強度を有している。



(ア)－第A.付6.7図 解析結果 (変形図)



(ア)－第A.付6.8図 解析結果 (応力分布図<トレスカの応力強さ>) (1/2)



(□)－第A. 付 6.8 図 解析結果 (応力分布図<トレスカの応力強さ>) (2/2)

(□)－第A. 付 6.3 表 ハンドリングベルトによる吊上げ時に本体部品に発生した最大応力

部品	応力強さ (MPa)	設計降伏応力 (MPa)
内筒		
胴ガセット		
胴外板		

A.4.4 吊上装置

輸送物には、(イ)一第C.5図に示すように前部に4個(2対)、後部に2個(1対)のトラニオンが取付けられており、これらのトラニオンによって吊上げ操作が行われる。

トラニオンによる吊上げ操作には、前部1対と後部1対を使用する水平吊り、前部1対を使用する垂直吊りがある。

ここでは、後部のトラニオンに比べて径の小さい前部トラニオンを対象として、トラニオンに作用する荷重が最大となる垂直吊りした場合について評価を行う。¹⁾

また、輸送物には、(イ)一第C.3図に示すように胴部の前部及び後部にそれぞれ1個のハンドリングベルトが取付けられており、これらのハンドリングベルトによって水平吊り操作が行われるため併せて評価を行う。

なお、上記の吊上げ操作において、吊上装置であるトラニオン及びハンドリングベルトを取付けた本体側も荷重を受けるが、本体は十分な強度を有している。(付属書類-6参照)

(1) 応力評価

a. トラニオン

(a) 最大荷重

トラニオンに作用する最大荷重は、次の式により求められる。なお、トラニオンを用いた吊上げ操作を行う場合には、輸送物から衝撃吸収カバーが取外された状態であるが、輸送物の全体質量を用いてトラニオンに作用する最大荷重Fを算出する。

$$F = m \times g \times \frac{G}{N}$$

ここで、m : 輸送物の質量 [19,500 kg]

g : 重力加速度 [9.81 m/s²]

G : 負荷係数 [3]

N : トラニオンの個数 [2]

したがって、

$$F = 2.87 \times 10^5 \text{ N}$$

(b) 応力計算

トラニオンの各部寸法及び荷重作用点を(ロ)一第A.2図に示す。

注1) 水平吊りにおける後部トラニオンについて評価すると、垂直吊りにおける前部トラニオンの方が厳しい結果となっている。(付属書類-5参照)

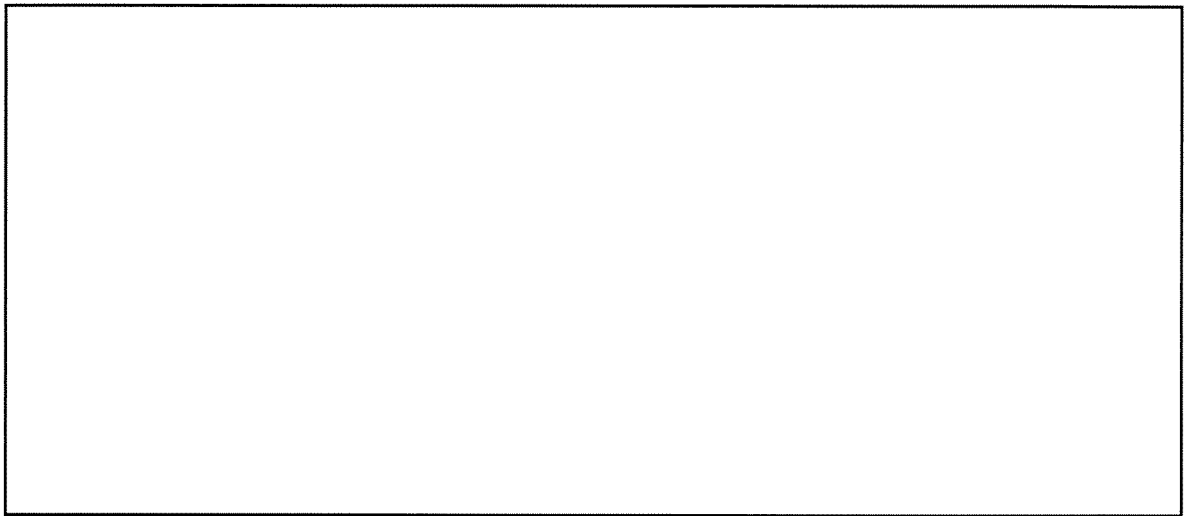
A. 10. 7 付属書類-7 一般の試験条件における口開き変形量

一般の試験条件の熱的試験及び自由落下における蓋板ガスケット部の口開き変形量を求め、ガスケットの初期締付け代（つぶれ代）と比較する。

(1) 熱的試験

口開き変形量は、密封境界となっている蓋板のガスケット取付け部（内側）のガスケット溝底面と上部フランジ面との距離の変化によって示される。（(p)－第A. 付 7. 1 図参照）

熱的試験では、蓋板締付けボルトによる初期締付け力を与え、内圧のみを負荷したケースと、内圧と温度分布を負荷したケースを評価しており、それぞれのケースについて、口開き変形量を(p)－第A. 付 7. 1表に示す。



(p)－第A. 付 7. 1 図 口開き変形量測定位置（熱的試験）

(p)－第A. 付 7. 1 表 一般の試験条件の熱的試験における口開き変形量

荷重条件	ガスケット 初期締付け代 (つぶれ代) (mm)	口開き変形量 (mm)
ボルト初期締付け+内圧		
ボルト初期締付け+内圧+温度分布		

*1 ガスケット径（最小値）とガスケット溝深さ（最大値）の差
 ここで、ガスケット径寸法: mm、ガスケット溝深さ寸法: mm

上記の結果が示すように、熱的試験における口開き変形量は、ガスケットの初期締付け代（つぶれ代）よりも十分小さく、密封性能に影響を与えない。

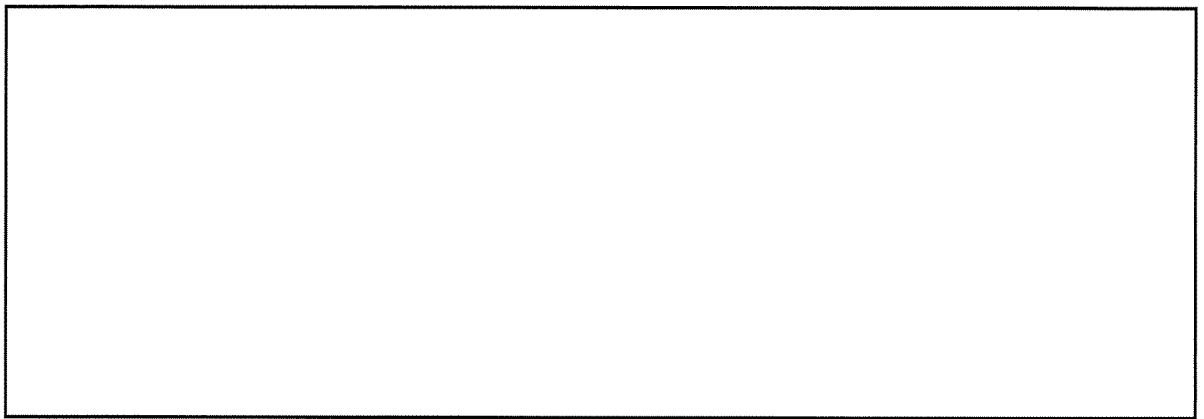
(2) 自由落下

蓋板ガスケット部の口開きが生じる可能性のある落下方向として、前部垂直落下、水平落下、前部コーナー落下が対象となる。

解析モデルが 180° モデルとなっているため、口開き変形量の測定位置は、代表として対称面 2 カ所と対称面から 90° の計 3 カ所とする。(□)－第 A. 付 7.2 図参照)

落下事象では、口開き変形量は時間とともに変化するため、輸送容器が剛体面に着床してから落下終了までの間の最大値と落下後の値を求める。

各落下方向について、口開き変形量を(□)－第 A. 付 7.2 表にまとめる。口開き変形量の最大値は、いずれも落下中瞬間的に生じており、その後、□ mm 以下となっている。



(□)－第 A. 付 7.2 図 口開き変形量測定位置 (自由落下)

(□)－第 A. 付 7.2 表 一般の試験条件の自由落下における口開き変形量

落下姿勢	ガスケット 初期締付け代 (つぶれ代) (mm)	口開き変形量 *1 (mm)	
		落下中 (最大値)	落下後 *2
前部垂直落下			
水平落下			
前部コーナー落下			

*1 測定位置 3 カ所の最大値

*2 解析終了時

上記の結果が示すように、自由落下において落下後の口開き変形量は、ガスケットの初期締付け代 (つぶれ代) よりも十分小さく、密封性能に影響を与えない。

解析モデルの寸法及び要素分割図を(□)－第A.24図及び(□)－第A.25図に示す。

(2) 荷重条件及び境界条件

a. 荷重条件

一次応力の算出にあたり、容器本体内部に[] MPa を負荷し、蓋板締付けボルトには以下に示す初期締付けによる軸力を作用させる。

初期締付けトルクによる軸力Fは次式で与えられる。

$$F = T \times \frac{1}{0.2 d}$$

ここで、T : 初期締付けトルク [[] N・mm]

d : ボルトの呼び径 [[] mm]

よって、 $F = 2.36 \times 10^5$ N

次に、(一次+二次)応力の算出にあたり、解析モデル全体に一般の試験条件の温度([]°C)を与える。

b. 境界条件

底板中央の軸方向変位、中心軸の半径方向変位、対称面の周方向変位を拘束する。

(3) 解析結果

(一次+二次)応力の算出における変形図及び応力分布図をそれぞれ(□)－第A.26図及び(□)－第A.27図に示す。

(□)－第A.28図に示す評価位置について、一次応力の評価結果を(□)－第A.10表に、(一次+二次)応力の評価結果を(□)－第A.11表に示す。同表に示すように容器本体に発生する応力はいずれも評価基準を下回っており、一般の試験条件の熱的試験により輸送物が影響を受けることはない。

なお、蓋板ガスケット取付け部における口開き変形量は、ガスケットの初期締付け代(つぶれ代)よりも十分小さく、密封性能に影響を与えない。(付属書類-7参照)

b. 荷重条件及び境界条件

落下姿勢に応じた角度で剛体面に接した解析モデルに対し、まず、蓋板締付けボルトに初期締付けによる引張応力 (□MPa) に相当する応力を発生させる。続いて、自由落下時の衝突速度 (2.43m/sec) を与える。

解析ケースとして、以下の各落下姿勢について解析を行う。

- ① 垂直落下 (前部及び後部)
- ② 水平落下
- ③ コーナー落下 (前部及び後部)

c. 解析結果

解析は最大変形が確認できる時刻まで実行し、解析結果として、最大変形量、落下中の各構造強度部材に発生する塑性歪及び蓋板締付けボルトの応力を抽出した。各落下姿勢における衝撃吸収カバーの変形図を(□)－第A.32図に示す。

各落下姿勢における損傷状態に関する解析結果を以下に示す。

(a) 前部垂直落下

容器本体の各部品には塑性歪の発生はなく、他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。また、蓋板締付けボルトに発生する応力は評価基準(S_y)を下回っている。

(b) 後部垂直落下

容器本体の各部品には塑性歪の発生はなく、他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。

(c) 水平落下

容器本体部品のうち、□に最大□%、□に□%以下の塑性歪(□)－第A.33図に示す。)が発生しているが、□形状は維持される。

したがって、水平落下において、容器本体には他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。また、蓋板締付けボルトに発生する応力は評価基準(S_y)を下回っている。

(d) 前部コーナー落下

容器本体の各部品には塑性歪の発生はなく、他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。また、蓋板締付けボルトに発生する応力は評価基準(S_y)を下回っている。

(e) 後部コーナー落下

容器本体の各部品には塑性歪の発生はなく、他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。

以上の解析結果を(ロ)－第A.12表にまとめる。

同表に示されるように、いずれの落下姿勢においても他の解析で考慮を要するような形状変化が生じるようなことはなく、自由落下試験に対して構造健全性は維持される。

また、前部垂直落下、水平落下及び前部コーナー落下において、蓋板ガスケット取付け部における口開き変形量は、ガスケットの初期締付け代（つぶれ代）よりも十分小さく、密封性能に影響を与えない。（付属書類-7 参照）

A. 5.6 角又は縁落下

本輸送物は、鋼製の円筒形で重量は19.5トンであり、角又は縁落下の対象には該当しない。

A. 5.7 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下の試験後の輸送物の安全性について以下に要約する。

(1) 熱的試験

本体及び蓋板並びに蓋板締付けボルトに発生する応力は、評価基準を下回っており、蓋板ガスケット取付け部における口開き変形量は、ガスケットの初期締付け代（つぶれ代）よりも十分小さい。

バスケットと容器本体の内面間には隙間が存在し、拘束による熱応力は生じない。したがって、熱的試験において容器の構造健全性及び密封性能は維持される。

(2) 水噴霧

水噴霧により、輸送容器の構成部品に劣化や腐食は生じることなく、密封性能及び遮蔽性能への影響はない。

(3) 自由落下

容器本体については、水平落下において \square に \square %、 \square に \square %以下の微小な塑性歪が発生したが、垂直、コーナー落下においては塑性歪の発生は見られなかった。また、いずれの落下姿勢においても蓋板締付けボルト及び密封シール面の発生応力は評価基準の降伏応力を下回っており、蓋板ガスケット取付け部における口開き変形量は、ガスケットの初期締付け代（つぶれ代）よりも十分小さい。

バスケットについては、最も厳しい落下姿勢である水平落下において、構成部品に塑性歪は発生していない。

したがって、自由落下において容器の構造健全性及び密封性能は維持される。

収納物である燃料集合体については、燃料被覆管を対象とした解析では垂直落下及び水平落下において塑性歪の発生は見られなかった。

したがって、自由落下において燃料被覆管に亀裂や破断が生じることはない。

(4) 積み重ね試験

輸送物の重量の5倍に相当する荷重を受けた時の胴部に発生する応力は、評価基準を下回っている。

したがって、積み重ね試験において胴部の構造健全性は維持される。

E.7 付属書類

E.7.1 付属書類-1 輸送物の損傷状態と臨界解析のモデル化方法

核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における輸送物の損傷状態と臨界解析のモデル化方法を(□)-第E.付1.1表～(□)-第E.付1.3表に示す。

なお、E.1及び(□)-第E.1表に示したように、本解析においては、規則で定められた条件を包含するように、通常輸送時、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件及び特別の試験条件に対し、これらを包含する損傷状態を考慮し、かつ、輸送物内への浸水を仮定した配列系の条件を用いた評価を行う。

(ロ)一第E.付1.1表 輸送物の損傷状態と臨界解析のモデル化方法 (本体、蓋部及び衝撃吸収カバナー)

部位	核分裂性輸送物に係る ¹⁾ 一般及び特別の試験条件	輸送物の損傷状態	臨界解析のモデル化方法	備考
本体、蓋部及び衝撃吸収カバナー	自由落下及び落下試験 I (0.3m+9m落下時)	<ul style="list-style-type: none"> 内筒に最大□%、胴ガセットに最大□%、胴外板に最大□%、上部フランジに最大□%及び底板に最大□%の局所的な塑性歪が発生するが、□下回る。 衝撃吸収カバナーに最大□mmの変形が生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> (ロ)一第E.1図～(ロ)一第E.3図に示すように、内筒のみをモデル化し、以下を無視する。 <ul style="list-style-type: none"> 胴ガセット 胴外板 胴部レジン 上部フランジ 底板 蓋板 衝撃吸収カバナー等 容器内部への水の浸入を想定する。²⁾ 輸送物が任意の配列で無制限存在すると仮定する。²⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 内筒より外側を無視することと安全側に輸送物間距離を接近させたモデルとしている。 内筒の変形については、以下の理由から変形を無視しモデル化している。 <ul style="list-style-type: none"> 自由落下及び落下試験 I において内筒に発生する塑性歪は、局所的かつ軽微であり、形状変化の影響は無視し得る。 落下試験 II における内筒の変形については、実効増倍率への影響は無視し得る。(付属書類一5) 熱的試験における内筒の拡大については、実効増倍率への影響は無視し得る。(付属書類一3) 容器内外での水密度については、実効増倍率が最大となるように最適化した条件としている。(付属書類一2)
	落下試験 II (1m落下時)	<ul style="list-style-type: none"> 胴外板、胴ガセットが破断し胴部レジンが露出する。 内筒の一部が内側に膨らむが破断には至らない。 蓋部レジンカバナーに最大約□mm、底部レジンカバナーに最大約□mmのへこみが生じる。 衝撃吸収カバナーが貫通する。 		
	熱的試験 (耐火試験)	<ul style="list-style-type: none"> 内筒の中央部分が膨らむように変形して内半径が□mm大きくなる。 レジンの一部が炭化する。 衝撃吸収カバナー内部の木材の一部が炭化する。 		
	浸漬試験 (0.9m及び15m浸漬)	<ul style="list-style-type: none"> 15m浸漬試験において損傷しない。 0.9m浸漬試験では、輸送容器の損傷に係わらず、容器内部への浸水を想定している。 		

注 1) 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件での水噴霧、積み重ね試験及び貫通において、輸送物への損傷は生じない。

注 2) 臨界解析モデル全体の共通事項

(ロ)一第E.付1.2表 輸送物の損傷状態と臨界解析のモデル化方法 (バスケット)

部位	核分裂性輸送物に係る ¹⁾ 一般及び特別の試験条件	輸送物の損傷状態	臨界解析のモデル化方法	備考
バスケット	自由落下及び落下試験 I (0.3m+9m落下時)	<ul style="list-style-type: none"> • []に最大 []%の局所的な塑性歪が発生するが、[]下回る。 • []に最大 []%の局所的な塑性歪が発生するが、[]下回る。 • アルミスペーサーに最大 []%の局所的な塑性歪が発生するが、[]下回る。 	<ul style="list-style-type: none"> • (ロ)一第E.1図～(ロ)一第E.3図に示すように、以下の部位をモデル化する。 <ul style="list-style-type: none"> — ロジメント [] — [] — アルミスペーサー • 各部位の変形はモデルに反映させず、製作公差を安全側に考慮したモデルとする。 	<ul style="list-style-type: none"> • 自由落下及び落下試験 Iにおいて、[]及びアルミスペーサーに発生する塑性歪は局所的かつ軽微であり、形状変化の影響は無視し得る。 • 落下試験 IIにおいて生じる各変形については、以下の理由から変形を無視しモデル化している。 <ul style="list-style-type: none"> — 直撃部近傍のアルミスペーサーの変形については、実効増倍率への影響は無視し得る。(付属書類-5) — []に局所的に []損傷が生じる可能性があるが、[] — []には破断は生じず、役割であるロジメントの保持機能は維持されている (ロジメントの配置は維持される)。 — ロジメントには、燃料集合体を損傷させるような変形は生じない。 • 熱的試験におけるアルミスペーサーの変形は軽微であり、形状変化の影響は無視し得る。
落下試験 II (1m落下時)		<ul style="list-style-type: none"> • 直撃部近傍のアルミスペーサーが変形する。 <ul style="list-style-type: none"> • []に [] • []塑性歪が局所的に発生するが、[] • []に発生した塑性歪 (最大 []%)は []下回る。 • []に最大 []%の局所的な塑性歪が発生するが、[]下回る。 • []に最大 []%の局所的な塑性歪が発生するが、[]下回る。 • 最大変形時においてもロジメントと収納物の間には隙間が存在する。([]燃料集合体が損傷することはない。) 		
熱的試験 (耐火試験)		<ul style="list-style-type: none"> • バスケットと容器本体の熱膨張差により、アルミスペーサーは径方向に最大 [] mm の圧縮変形を受ける。 		
浸漬試験 (0.9m及び15m浸漬)		<ul style="list-style-type: none"> • 15m浸漬試験において損傷しない。 • 0.9m浸漬試験では、輸送容器の損傷に係わらず、容器内部への浸水を想定している。 		

注1) 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件での水噴霧、積み重ね試験及び貫通において、輸送物への損傷は生じない。

(ロ) 第E. 付 1. 3 表 輸送物の損傷状態と臨界解析のモデル化方法 (収納物)

部位	核分裂性輸送物に係る ¹⁾ 一般及び特別の試験条件	輸送物の損傷状態	臨界解析のモデル化方法	備考
収納物	自由落下及び落下試験 I (0. 3m + 9m 落下時)	<ul style="list-style-type: none"> 燃料被覆管は損傷しない。 	<ul style="list-style-type: none"> (ロ) 第E. 2 図及び(ロ) 第E. 3 図に示すように、燃料集合体のうち燃料(二酸化ウラン)と燃料被覆管のみをモデル化し、軸方向に無限長を仮定する。 燃料集合体について全スパンの燃料棒がロジメント内に均一に拡がった場合を仮定する。 燃料被覆管内部への水の侵入は想定しない。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料被覆管に変形は生じないが、保守的に燃料集合体について全スパンの燃料棒ピッチの變化を仮定している。(付属書類 4)
	落下試験 II (1m 落下時)	<ul style="list-style-type: none"> 燃料被覆管は損傷しない。 		
	熱的試験 (耐火試験)	<ul style="list-style-type: none"> 燃料被覆管は損傷しない。 		
	浸漬試験 (0. 9m 及び 15m 浸漬)	<ul style="list-style-type: none"> 15m 浸漬試験において燃料被覆管は損傷しない。 		

注 1) 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件での水噴霧、積み重ね試験及び貫通において、輸送物への損傷は生じない。

E.7.5 付属書類-5 内筒とアルミスペーサーの変形を考慮した実効増倍率

(㊦)-A構造解析のA.9.2 に示すように、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の胴部を直撃する1m落下試験において、直撃部では内筒とアルミスペーサーが内側に押し付けられるように変形する。

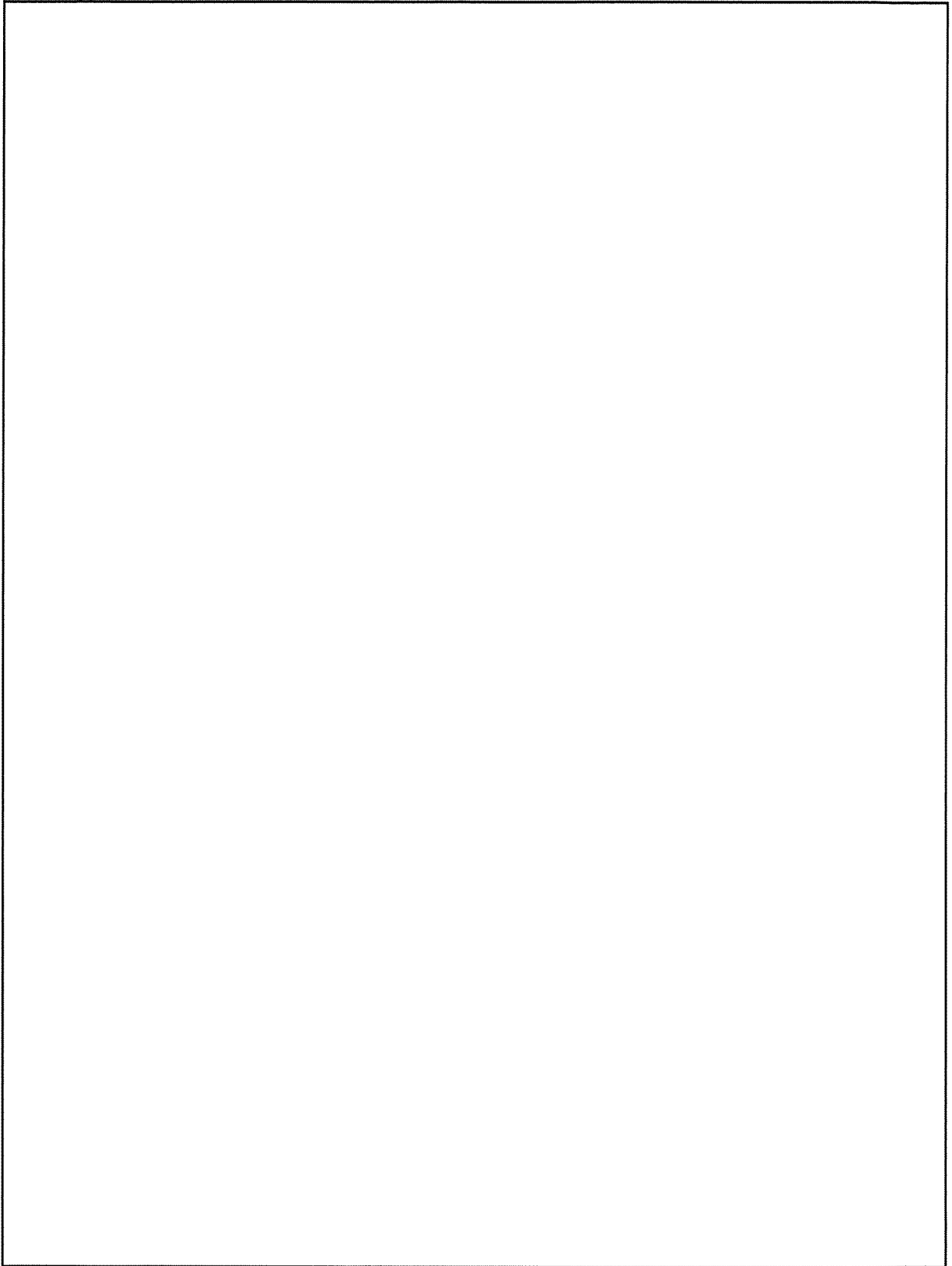
この影響を確認するために、部分的に内筒とアルミスペーサー（外周部）を部品間の隙間なく内側に押し付けた形状を与えた解析モデルによる計算を行った。

変形させる範囲は、落下試験の結果を包含するように、軸方向については1つの のある領域を含む2つの のない領域とした。また、径方向位置については、代表として45°方向と90°方向の2ケースを考慮した。

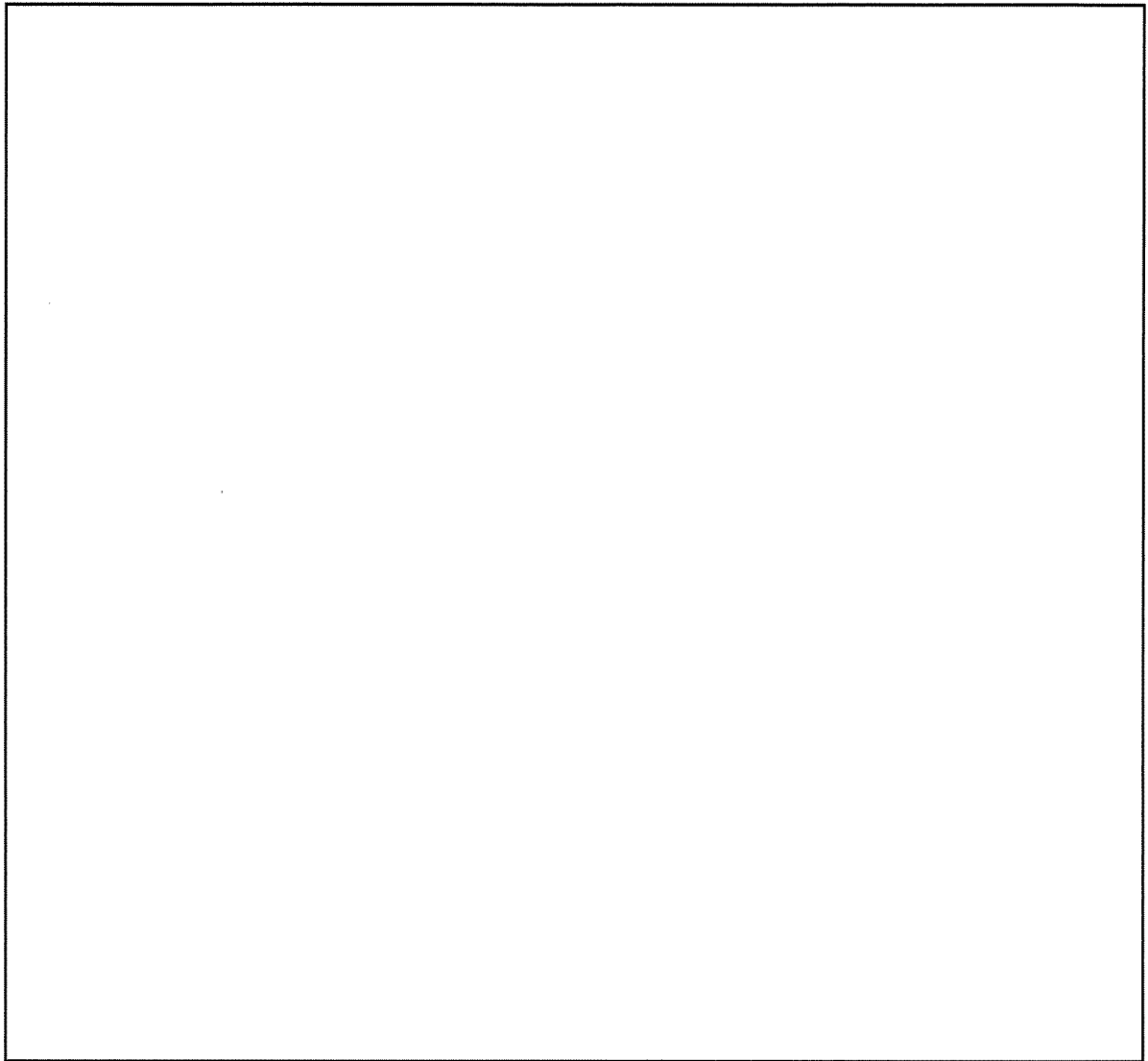
なお、変形は直撃部に限定されるため、完全反射境界の位置は変更していない。

解析モデルを(㊦)-第E.付5.1図～(㊦)-第E.付5.5図に示す。E.3.1に示した解析モデルとの違いは上述した内筒とアルミスペーサー（外周部）の変形のみである。その他の解析条件はE.3モデル仕様に示したものと同一である。

(㊦)-第E.付5.1表に示すように、部分的な内筒とアルミスペーサー（外周部）の変形による実効増倍率への影響は無視できることが確認された。

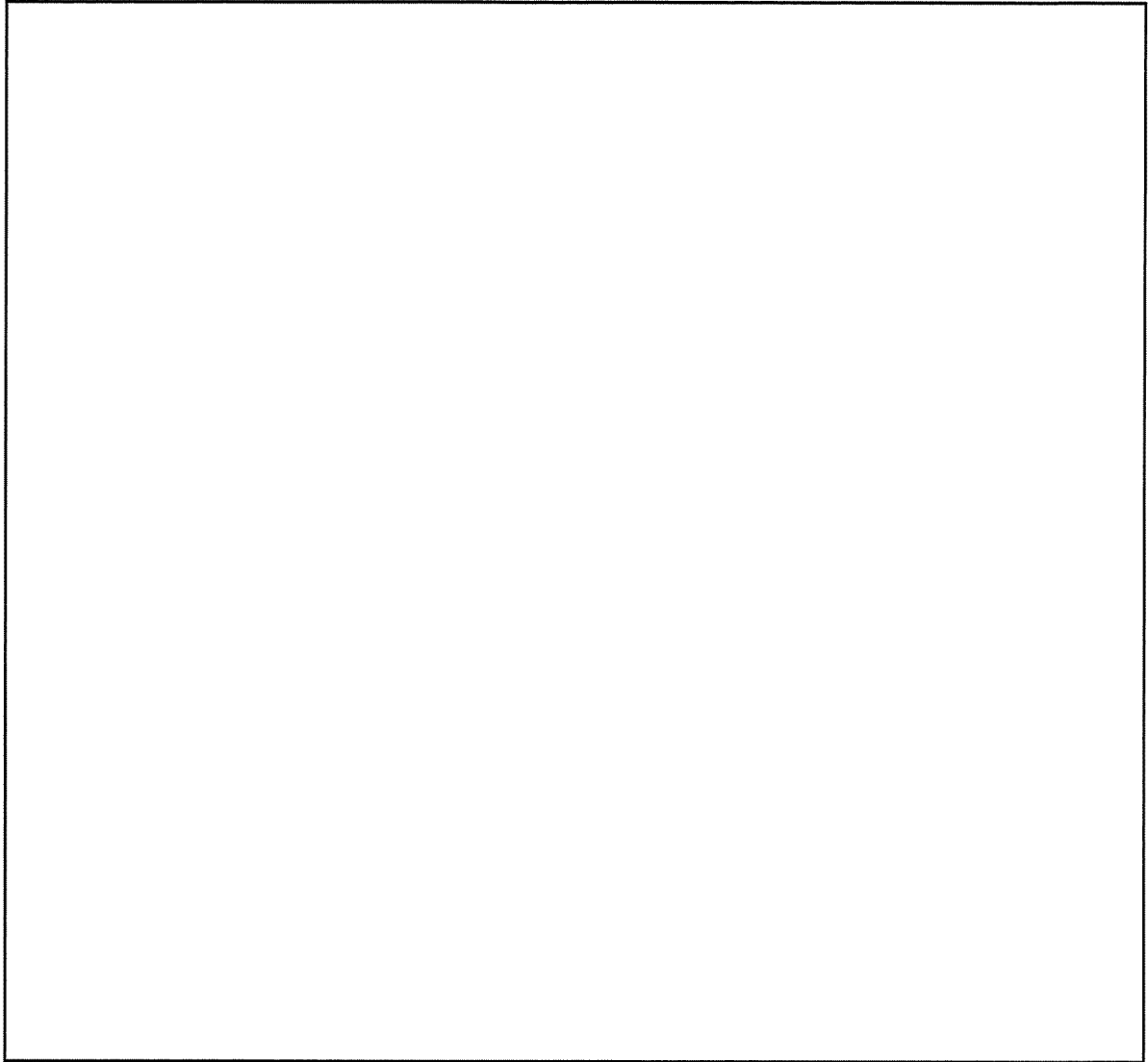


(ロ)－第E.付5.1図 内筒とアルミスペーサーの変形の影響評価のための臨界解析モデル
(縦断面図)



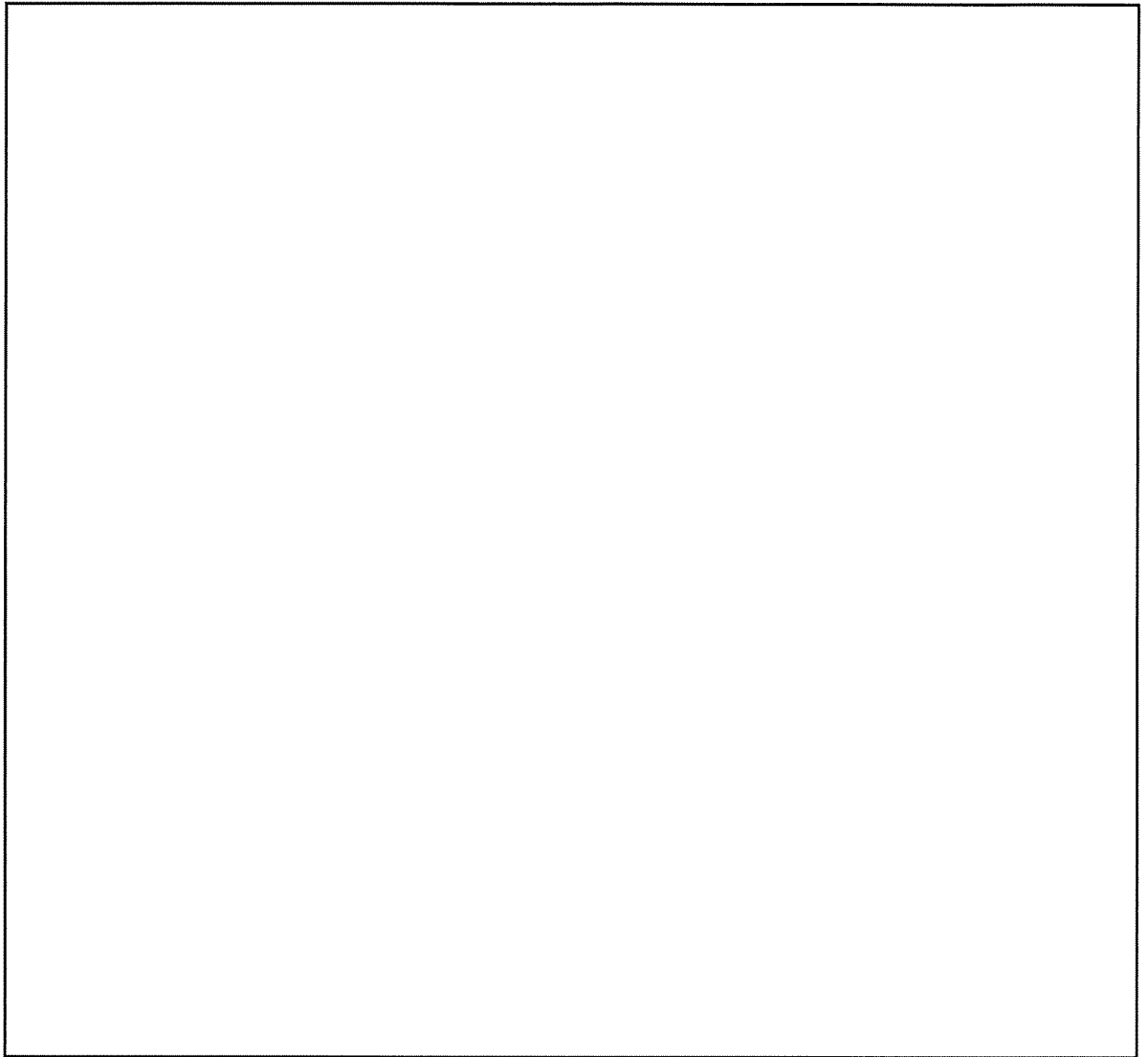
(□)－第 E. 付 5.2 図 内筒とアルミスペーサーの変形の影響評価のための臨界解析モデル
(変形位置が 45° 方向の場合 / 横断面図)





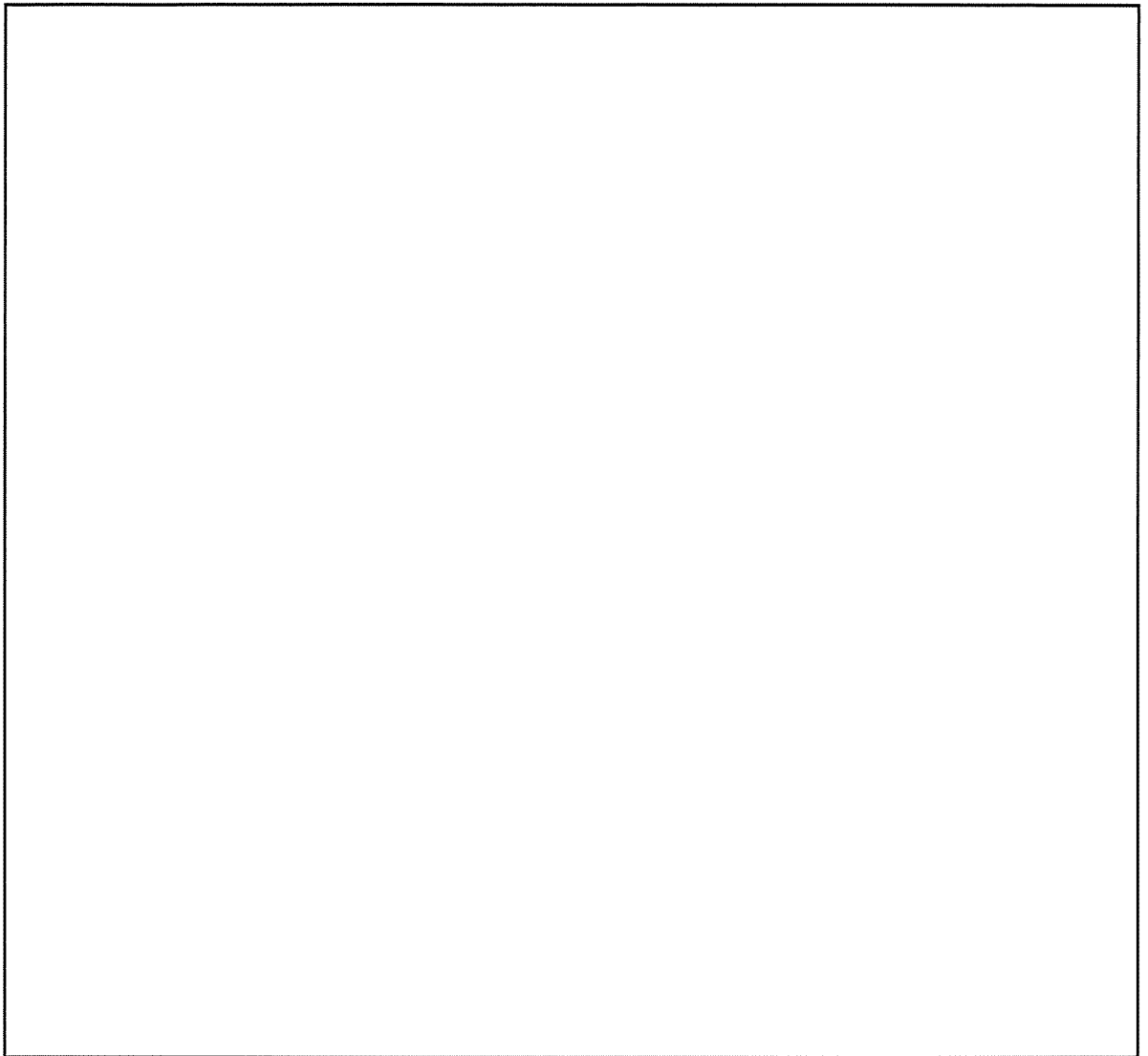
(㊦)－第E. 付 5.3 図 内筒とアルミスペーサーの変形の影響評価のための臨界解析モデル
(変形位置が 45° 方向の場合 / 横断面図)





(□)－第E.付5.4図 内筒とアルミスペーサーの変形の影響評価のための臨界解析モデル
(変形位置が 90° 方向の場合 / 横断面図)





(㊦) 第 E. 付 5.5 図 内筒とアルミスペーサーの変形の影響評価のための臨界解析モデル
(変形位置が 90° 方向の場合 / 横断面図)



(ア) 第E. 付 5.1 表 内筒とアルミスペーサーの変形の有無における実効増倍率の比較

内筒とアルミスペーサー	k_{eff}	σ	$k_{eff} + 3\sigma$
変形無し			
変形有り (径方向位置：45°)			
変形有り (径方向位置：90°)			

b. 荷重条件及び境界条件

落下姿勢に応じた角度で剛体面に接した解析モデルに対し、まず、蓋板締付けボルトに初期締付けによる引張応力 (□MPa) に相当する応力を発生させる。続いて、自由落下時の衝突速度 (2.43m/sec) を与える。

解析ケースとして、以下の各落下姿勢について解析を行う。

- ① 垂直落下 (前部及び後部)
- ② 水平落下
- ③ コーナー落下 (前部及び後部)

c. 解析結果

解析は最大変形が確認できる時刻まで実行し、解析結果として、最大変形量、落下中の各構造強度部材に発生する塑性歪及び蓋板締付けボルトの応力を抽出した。各落下姿勢における衝撃吸収カバーの変形図を(□)－第A.32図に示す。

各落下姿勢における損傷状態に関する解析結果を以下に示す。

(a) 前部垂直落下

容器本体の各部品には塑性歪の発生はなく、他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。また、蓋板締付けボルトに発生する応力は評価基準(S_y)を下回っている。

(b) 後部垂直落下

容器本体の各部品には塑性歪の発生はなく、他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。

(c) 水平落下

容器本体部品のうち、□に最大□%、□に□%以下の塑性歪((□)－第A.33図に示す。)が発生しているが、□形状は維持される。

したがって、水平落下において、容器本体には他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。また、蓋板締付けボルトに発生する応力は評価基準(S_y)を下回っている。

(d) 前部コーナー落下

容器本体の各部品には塑性歪の発生はなく、他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。また、蓋板締付けボルトに発生する応力は評価基準(S_y)を下回っている。

(e) 後部コーナー落下

容器本体の各部品には塑性歪の発生はなく、他の解析で考慮を要する形状の変化は生じない。

以上の解析結果を(ロ)－第A.12表にまとめる。

同表に示されるように、いずれの落下姿勢においても他の解析で考慮を要するような形状変化が生じるようなことはなく、自由落下試験に対して構造健全性は維持される。

また、前部垂直落下、水平落下及び前部コーナー落下において、蓋板ガスケット取付け部における口開き変形量は、ガスケットの初期締付け代（つぶれ代）よりも十分小さく、密封性能に影響を与えない。（付属書類-7 参照）

(5) 貫 通

胴外板に 6 kg 棒を 1m 高さから落下させた場合でも貫通することなく、密封性能に影響は生じない。

A. 6 特別の試験条件

本輸送物は A 型輸送物であり、本項の試験条件は該当しない。

A. 7 強化浸漬試験

本輸送物の最大放射エネルギーは A_2 値以下であり、本項の試験条件は該当しない。

A. 8 放射性収納物

本輸送物の放射性収納物は、未使用の PWR 燃料集合体である。

PWR 燃料集合体の仕様及び構造図をそれぞれ (イ) - 第 D. 1 表及び (イ) - 第 D. 1 図 ~ (イ) - 第 D. 3 図に示す。

燃料集合体の強度については、A. 9 核分裂性輸送物において評価しており、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の自由落下及び特別の試験条件である 9m 落下において、燃料被覆管に塑性歪の発生はない。したがって、燃料被覆管が破断して燃料被覆管内の燃料が容器内部空間に放散されることはない。

A. 9 核分裂性輸送物

本輸送物は、核分裂性輸送物に該当する。

したがって、(ロ) - E 臨界解析に影響する形状変化等を、以下の試験条件に対して評価する。

A. 9.1 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件

核分裂性輸送物に係る一般の試験条件として、水噴霧、自由落下、積み重ね試験及び貫通の各試験の重畳効果を考慮する。

核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における輸送物の損傷状態を A. 5 の解析結果をもとに評価すると以下ようになる。

(1) 水噴霧

A. 5. 2 と同様に、輸送物に損傷はない。

(2) 自由落下

A. 5.3 と同様に、緩衝体に変形が生じるが容器本体に発生する塑性歪は局所的であり形状は維持される。

燃料被覆管は、A. 5.3 に示すように、自由落下において塑性歪の発生はなく、破断することはない。

(3) 積み重ね試験

A. 5.4 と同様に、容器本体に損傷はない。

(4) 貫通

A. 5.5 と同様に、容器本体に損傷はない。

以上の結果より、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における輸送物の損傷状態は (□) ー 第 A. 19 表 のようにまとめられる。本輸送物は、(□) ー 第 A. 20 表 に示すように、規則及び告示に定められている核分裂性輸送物に係る一般の試験条件としての要件を満足する。

(□) ー 第 A. 19 表 核分裂性輸送物に係る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
水噴霧	損傷なし
自由落下	衝撃吸収カバーが変形する 容器本体に発生する塑性歪は局所的であり 形状は維持される
積み重ね試験	損傷なし
貫通	損傷なし

(□) ー 第 A. 20 表 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件における適合性評価

核分裂性輸送物としての要件	評価
構造部に一辺 10 cm の立方体を包含するようなくぼみが生じないこと。	衝撃吸収カバーが変形するが、一辺 10 cm の立方体を包含するようなくぼみは生じない。
外接する直方体の各辺が 10 cm 以上であること。	外接する直方体の各辺は 10 cm 以上である。

A. 9.2 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件として、次の試験手順のうち最大の破損を受ける条件の下に置く。

- (a) 一般の試験条件後の損傷状態 + 9m落下試験 + 1m落下試験 + 熱的試験（耐火）
+ 0.9m浸漬試験
- (b) 一般の試験条件後の損傷状態 + 15m浸漬試験

本輸送容器は、水深 15mに相当する外圧に対して十分な構造強度を有しており容器本体部品に損傷は生じない。（付属書類-4 参照）

したがって、上記(a)と(b)のうち、輸送物の損傷が生じる(a)の条件で重畳効果を考慮する。

ここで、一般の試験条件としては、(□)－第A. 19表に示すように損傷がある自由落下を考慮する。

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件における輸送物の損傷状態を以下に評価する。

(1) 9m落下試験

A. 9.1の自由落下と9m落下の落下方向が同一の場合に衝撃吸収カバーの変形量が最大になり、輸送物に作用する衝撃も最大になると考えられるため、0.3mと9mを合計して落下高さを9.3mとした場合について検討する。

A. 5.3にて述べたように、輸送物の落下時における挙動については、実機の□
□モデルを用いたモックアップ試験が実施されており、種々の落下姿勢及び条件における変形、衝撃加速度及び密封機能の状態が測定された。試験の結果、9m落下において容器本体に変形は見られず密封機能の損傷も生じていないことが確認されている。

ここでは、解析手法を用いて容器本体、バスケット及び収納物の落下時における挙動を定量的に求める。

a. 容器本体

容器本体及び衝撃吸収カバーを実形状に従ってモデル化して、9m落下時（落下高さは9.3m）の事象を動的解析コードLS-DYNAを用いて模擬し、容器本体各部に発生する応力及び歪を求め、臨界解析に影響する形状変化等について評価する。

なお、容器本体に作用する衝撃荷重は、衝撃吸収カバーの緩衝特性に依存することから、解析モデルに与える衝撃吸収カバーの特性の妥当性は、モックアップ試験の代表的なケースを対象とした確認解析により確認している。（付属書類-2 参照）

(a) 解析モデル

解析モデルは、A.5.3の自由落下の評価に用いたものと同じモデルを適用する。

(b) 荷重条件及び境界条件

落下姿勢に応じた角度で剛体面に接した解析モデルに対し、まず、蓋板締付けボルトに初期締付けによる引張応力 (MPa) に相当する応力を発生させる。続いて、9m落下時の衝突速度 (9.3mの落下高さに相当する 13.6m/sec) を与える。

解析ケースとして、以下の各落下姿勢について解析を行う。

- ① 垂直落下 (前部及び後部)
- ② 水平落下
- ③ コーナー落下 (前部及び後部)
- ④ 傾斜落下 (二次衝撃：蓋側、傾斜角度：30°)

(c) 解析結果

解析は最大変形が確認できる時刻まで実行し、解析結果として、最大変形量、落下中の各構造強度部材に発生する歪及び蓋板締付けボルトの応力を抽出した。各落下姿勢における衝撃吸収カバーの変形図を (p) - 第A.48図 ~ (p) - 第A.53図 に示す。

各落下姿勢における損傷状態に関する解析結果を以下に示す。

i. 前部垂直落下

容器本体部品に塑性歪の発生はなく、形状の変化は生じない。

ii. 後部垂直落下

容器本体部品のうち、に%以下、にそれぞれ最大%、%及び%の塑性歪 ((p) - 第A.54図に示す。)が発生しているが、

形状は維持される。

iii. 水平落下

容器本体部品のうち、にそれぞれ最大%、%、%、%及び%の塑性歪（(a)－第A. 55 図に示す。）が発生しているが、
形状は維持される。蓋板締付けボルトの発生応力は降伏応力を下回っており、塑性歪の発生はなく破断することはない。

iv. 前部コーナー落下

容器本体部品のうち、にそれぞれ最大%、%及び%の塑性歪（(a)－第A. 56 図に示す。）が発生しているが、

形状は維持される。蓋板締付けボルトの発生応力は降伏応力を下回っており、塑性歪の発生はなく破断することはない。

v. 後部コーナー落下

容器本体部品のうち、にそれぞれ最大%、%及び%の塑性歪（(a)－第A. 57 図に示す。）が発生しているが、

形状は維持される。

vi. 傾斜落下

容器本体部品のうちに%以下の塑性歪（(a)－第A. 58 図に示す。）が発生しているが、形状は維持される。蓋板締付けボルトの発生応力は降伏応力を下回っており、塑性歪の発生はなく破断することはない。

以上の容器本体の解析結果を(a)－第A. 21 表にまとめる。

(ア) 第A.21表 9m落下における容器本体の解析結果のまとめ (1/2)

落下姿勢	衝撃吸収カバー 最大変形量 ¹⁾ (mm)	部 品	最大塑性歪 (%)	最小破断 伸び (%)	評 価
前部垂直		蓋 板			
		上部フランジ			
		内 筒			
		胴ガセット			
		胴外板			
後部垂直		内 筒			
		胴ガセット			
		胴外板			
		底 板			
		蓋 板			
水平		上部フランジ			
		内 筒			
		胴ガセット			
		胴外板			
		底 板			
		蓋 板			
前部 コーナー		上部フランジ			
		内 筒			
		胴ガセット			
		胴外板			
	内 筒				
後部 コーナー	胴ガセット				
	胴外板				
	底 板				
	蓋 板				
傾斜 (30°)	上部フランジ				
	内 筒				
	胴ガセット				
	胴外板				
	底 板				
	蓋 板				

注 1) 衝撃吸収カバーの変形量は特別の試験条件の熱解析の解析モデルに考慮される。

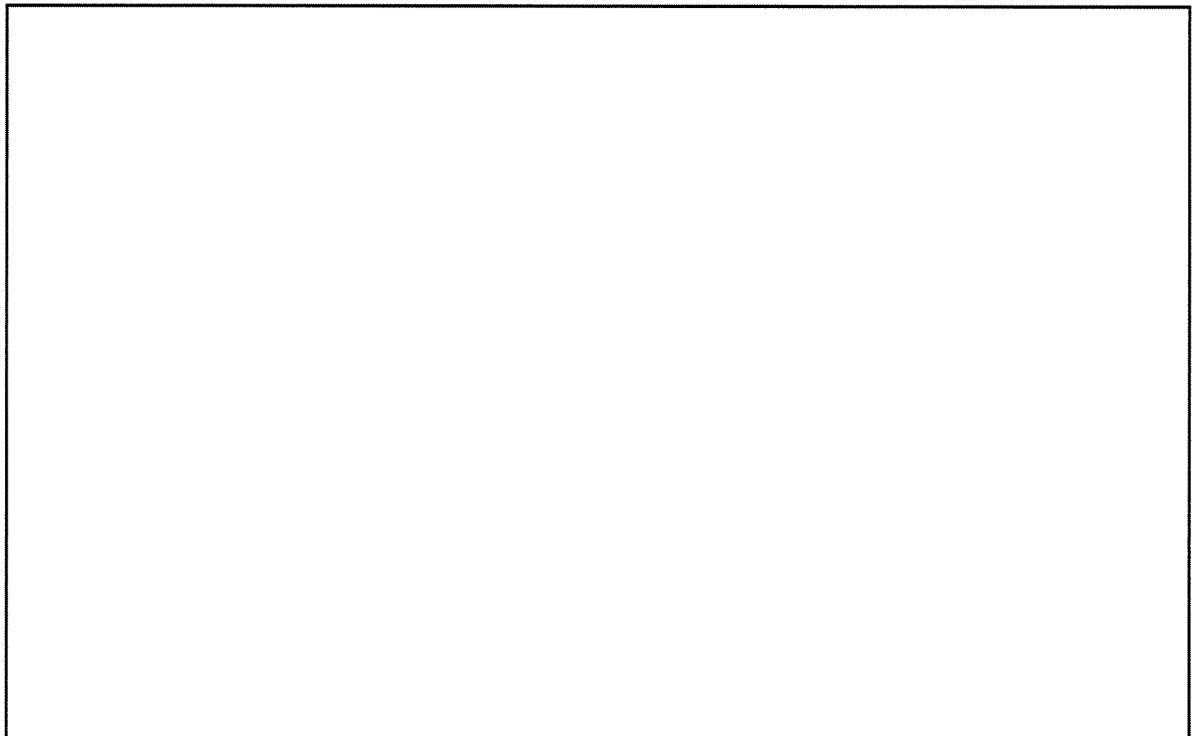
(c) 解析結果

水平落下におけるバスケットの損傷状態は以下のとおりである。

- ・ には、最大 %の塑性歪が発生しているが、 形状は維持される。
- ・ には最大 %の塑性歪が発生しているが、
 あり形状は維持される。
- ・ バスケットの周囲に位置するアルミスペーサーには、
による最大 %の塑性歪が発生しているが、 形状は維持される。

バスケットの各部品について、最大の塑性歪が発生した落下方向における塑性歪分布図を (p)－第A. 60 図～(p)－第A. 62 図に示す。

バスケットの解析結果を (p)－第A. 22 表にまとめる。



(p)－第A. 60 図 9m水平落下/バスケットの解析結果 (塑性歪分布図)
(ロジメント/ 方向落下時)

(㊦) - 第A.22表 9m落下におけるバスケットの解析結果のまとめ

落下方向	部 品	最大塑性歪 (%)	最小破断 伸び (%)	評 価
<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div>	ロジメント	<div style="border: 1px solid black; width: 200px; height: 150px; margin: 0 auto;"></div>		
	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			
	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			
	アルミスパーサー			
<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div>	ロジメント	<div style="border: 1px solid black; width: 200px; height: 150px; margin: 0 auto;"></div>		
	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			
	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			
	アルミスパーサー			
<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div>	ロジメント	<div style="border: 1px solid black; width: 200px; height: 150px; margin: 0 auto;"></div>		
	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			
	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>			
	アルミスパーサー			

(ア) 第A.23表 9m落下における燃料被覆管の解析結果のまとめ

条 件	最大塑性歪 (%)		最小破断伸び (%)
	10 フィート	12 フィート	
9m垂直落下			□
9m水平落下			

(2) 1m落下試験

本試験は、輸送物が最大損傷を受けるよう直径 15 cm の軟鋼棒上に、1mの高さから落下させるものである。

先に述べたように、輸送容器の落下時における挙動を評価するために、□
モデルを用いたモックアップ試験が実施されており、9m落下に併せて軟鋼棒上への 1 m落下が行われている。モックアップ試験では、蓋部を直撃する垂直落下、底部を直撃する垂直落下、胴部を直撃する水平落下が実施され、直撃部の損傷状態及び密封性の変化が測定された。

各落下姿勢について、モックアップ試験及び解析に基づく評価を以下に示す。

a. 蓋部を直撃する垂直落下

試験の状態及び落下後の直撃部の状態を写真(ア) 第A.1及び写真(ア) 第A.2に示す。

観察された事項は次のとおり。

- ・ 前部衝撃吸収カバーは貫通した。
- ・ 蓋部レジンに最大 □ mm のへこみが生じた。蓋部レジンカバーには半円状の亀裂が見られた。
- ・ 蓋板には損傷は見られなかった。
- ・ 引き続き実施した 9m前部垂直落下の後に測定した容器本体の漏えい率（ヘリウムリークテスト）は、リークタイトのレベル ($10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) を下回っており、密封は維持されていた。

以上の結果から、蓋部を直撃する 1m 落下における、臨界解析で考慮を要する形状変化を以下に示す。

- ・ 前部衝撃吸収カバーに穴があき蓋部レジンカバーに最大約 mm のへこみが生じる可能性がある。

b. 底部を直撃する垂直落下

試験の状態及び落下後の直撃部の状態を写真 (p) - 第 A. 3 及び写真 (p) - 第 A. 4 に示す。

観察された事項は次のとおり。

- ・ 後部衝撃吸収カバーは貫通した。
- ・ 底部レジンに最大 mm のへこみが生じた。底部レジンカバーには亀裂は見られなかった。
- ・ 落下の後に測定した容器本体の漏えい率（ヘリウムリークテスト）は、リークタイトのレベル (10^{-8} Pa \cdot m³ \cdot s⁻¹) を下回っており、密封は維持されていた。

以上の結果から、底部を直撃する 1m 落下における、臨界解析で考慮を要する形状変化を以下に示す。

- ・ 後部衝撃吸収カバーに穴があき底部レジンカバーに最大約 mm のへこみが生じる可能性がある。

c. 胴部を直撃する水平落下

胴部への直撃にあたっては、胴外板及び胴ガセットに最大の損傷を与えることを目的として、水平から□□傾けた落下姿勢が採用された。

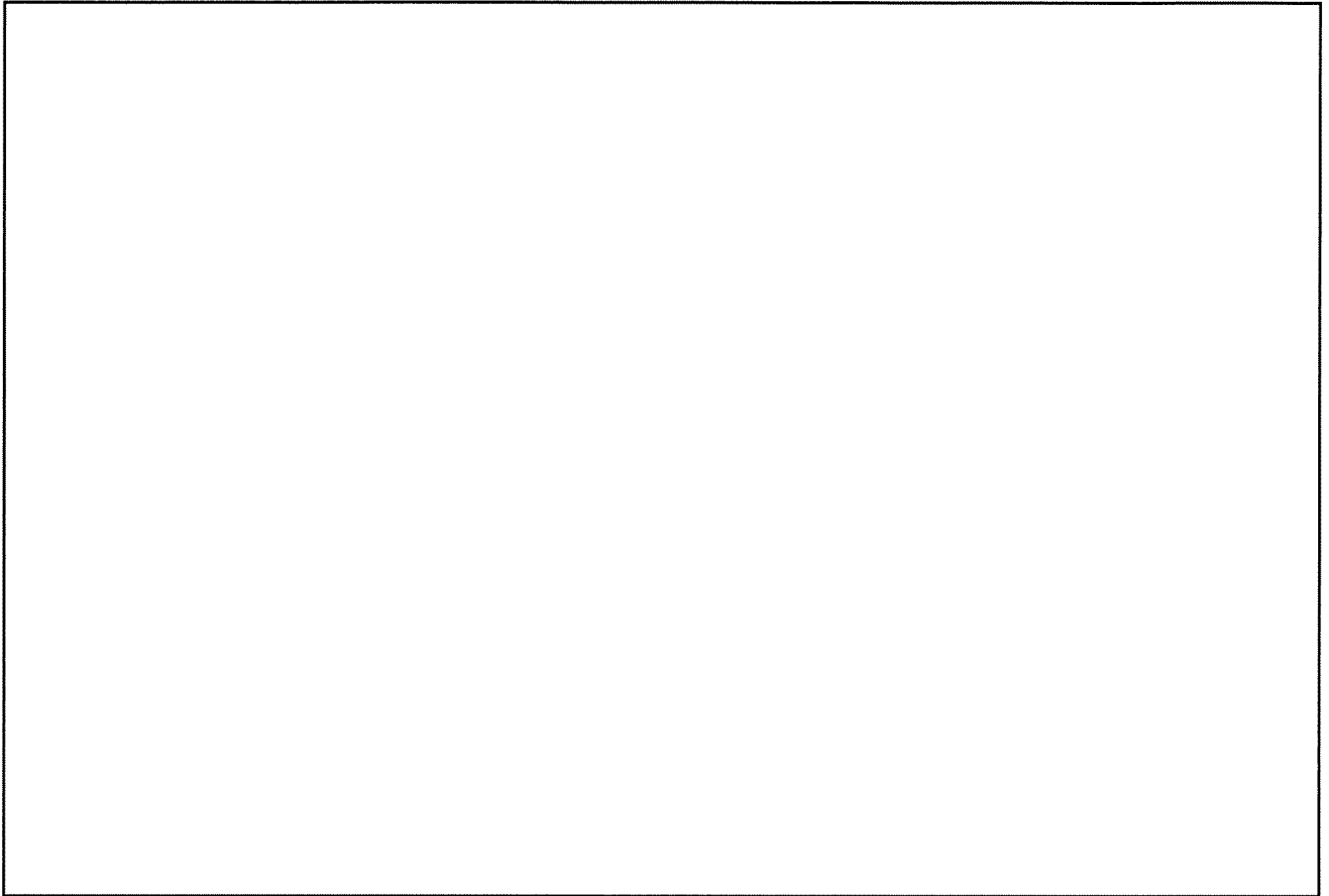
試験の状態及び落下後の直撃部の状態を写真(□)－第A.5及び写真(□)－第A.6に示す。

観察された事項は次のとおり。

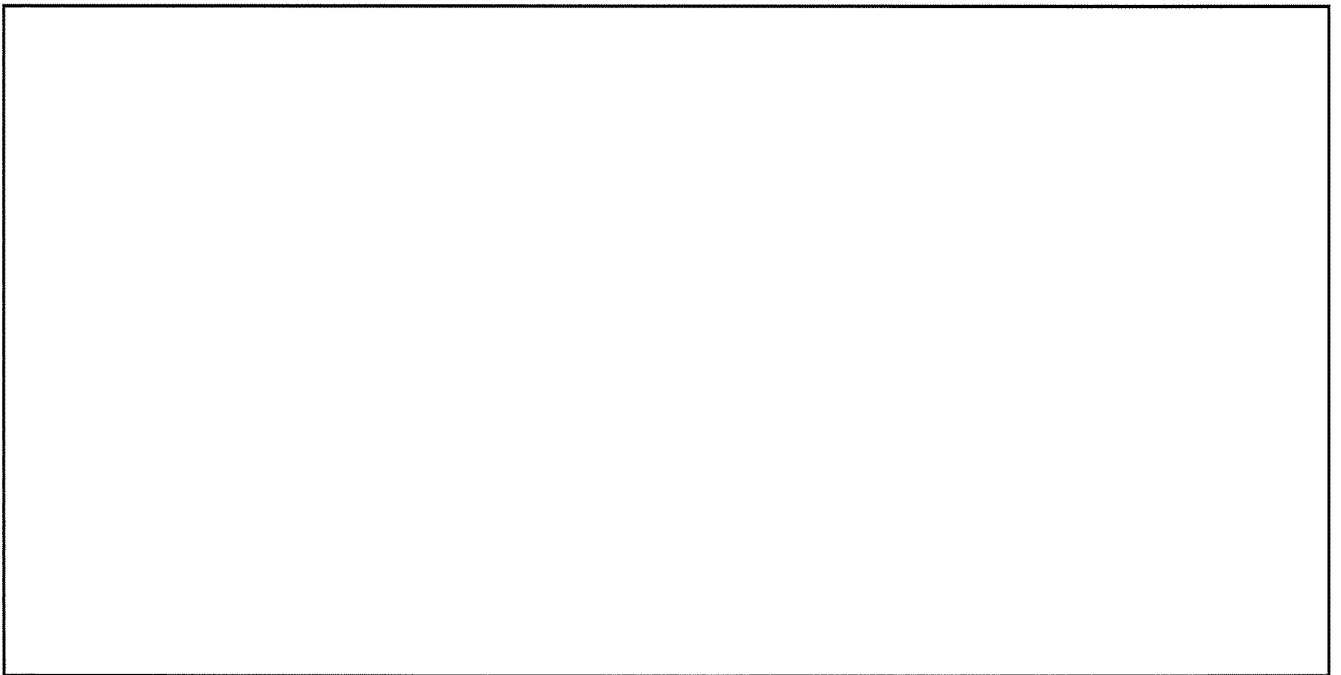
- ・胴外板及び胴ガセットが破断して、胴部に最大□mmの深さのくぼみが生じた。
また、このくぼみにより内筒の一部が内側に膨らむ変形が生じた。
- ・落下の後に測定した容器本体の漏えい率（ヘリウムリークテスト）は、リークタイトのレベル（ 10^{-8} Pa・m³・s⁻¹）を下回っており、密封は維持されていた。

以上の結果から、胴部を直撃する1m落下における、臨界解析で考慮を要する形状変化を以下に示す。

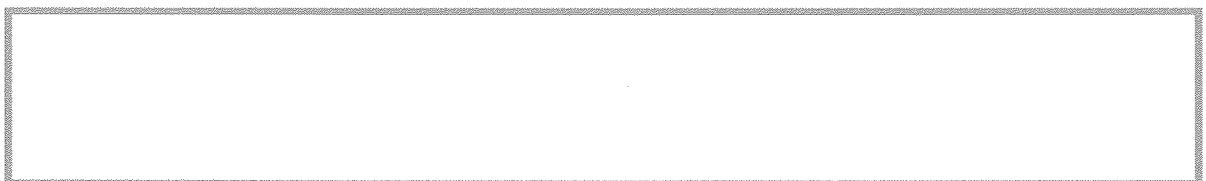
- ・直撃部近傍の胴外板及び胴ガセットが破断し、胴外板の亀裂により胴部レジンが露出する可能性がある。また、胴部にくぼみが生じ、このくぼみにより内筒の一部が内側に膨らむ変形が生じる。



(ア)－第A.74図 に発生した塑性歪 (方向)



(ア)－第A.75図 ロジメントに発生した塑性歪 (方向)



(3) 熱的試験（耐火試験）

a. 容器本体

耐火試験による容器本体の損傷状態を以下に評価する。

火災発生 30 分後における各部品の最高温度は(□)－第A.24 表に示すとおりである。

また、特別の試験条件における輸送物の最大内圧は□ MPa 絶対圧である。したがって、本試験では内外圧力差を□ MPa として評価する。

(□)－第A.24 表 火災発生 30 分後における各部品の最高温度

(単位：℃)

容器本体部品	熱解析結果
胴外板	
胴ガセット	
内筒	
上部フランジ	
底板	
蓋板	
蓋板締付けボルト	

耐火試験では、(□)－第A.24 表に示したように、胴部の外面と内面で大きな温度差が生じ、外面の胴外板及び胴ガセットの熱膨張により、内面の内筒に変形が生じる可能性がある。

内筒の変形量を保守的に評価するために、胴外板と胴ガセットは弾性体の物性を与え、一方、内筒をはじめ上部フランジ、底板、蓋板には弾完全塑性体の物性を与えて、内筒の変形挙動を解析コード ABAQUS を用いた弾塑性解析により評価する。

(a) 解析モデル

解析モデルとして、A.5.1 と同様に容器本体の□ 3次元モデルを用いる。

当該モデルは、本体（上部フランジ、内筒、胴ガセット、胴外板及び底板）と蓋部（蓋板及び蓋板締付けボルト）で構成されており、蓋板は蓋板締付けボルトを介して上部フランジに接続され、蓋板と上部フランジの接触が考慮されている。

(㊦)－第A.25表 特別の試験条件の熱的試験における容器本体の解析結果のまとめ (1/2)

容器本体部品	最大塑性歪 (%)	最小破断伸び (%)	評 価
内筒			
上部フランジ			
蓋板			
底板			

(㊦)－第A.25表 特別の試験条件の熱的試験における容器本体の解析結果のまとめ (2/2)

部 品	応力の種類	応力 (MPa)	評 価
蓋板締付け ボルト	σ_m		発生応力は $S_y^{1)}$ を下回っており破断しない。
	$\sigma_m + \sigma_b$		

注 1) 蓋板締付けボルトの S_y (降伏応力) は、 MPa (°C)

ここで、 D_1 : 容器本体の内径最小値 [mm] (公差を考慮した最小値)
 D_2 : バスケットの外径最大値 [mm] (公差を考慮した最大値)
 T_1 : 胴部の温度 [°C]
 T_2 : バスケットの温度 [°C]
 α_1 : 胴部の線膨張係数 [/°C (°C)]
 α_2 : バスケットの線膨張係数 [/°C (°C)]

よって、 $\Delta D =$ mm

となり、バスケットの半径方向の膨張により、一時的にバスケットの外表面が胴部の内面に接触する可能性がある。これにより、バスケットの外周に位置するアルミスペーサーが、胴部からの圧縮を受ける可能性はあるが、アルミスペーサーは十分な変形代を有する中空の構造となっており、胴部からの圧縮はアルミスペーサーにより吸収されるため、バスケットの構造強度部品である に変形は及ばない。

c. 燃料被覆管

耐火試験における温度上昇に伴う内圧の変化による燃料被覆管への影響を評価する。

(p) - B.5 に示されているように、耐火試験におけるバスケットの最高温度は °C 以下であるため、保守的に燃料被覆管の温度を °C とする。

耐火試験における燃料被覆管の内圧 (ゲージ圧) P_i は以下ようになる。

$$P_i = P_o \times \frac{T}{T_o} - 0.101$$

ここで、 P_o : 内部気体充填圧力 (20°C) [MPa 絶対圧]

T_o : 内部気体初期温度 [293 K (20°C)]

T : 燃料被覆管最高温度 [K (°C)]

したがって、

$$P_i = \text{} \times \frac{\text{} \text{ MPa}$$

内圧 P_i によって燃料被覆管に発生する応力は、内圧を受ける円筒の式を用いて以下のように求められる。

(㍀)－第A.26表 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下の輸送物の損傷状態


条 件	輸送物の損傷状態
9m落下	<ul style="list-style-type: none"> ・ 衝撃吸収カバーが変形する。 ・ 容器本体に局所的な塑性歪が発生するが破断に至ることはなく形状は維持される。 ・ バスケットに局所的な塑性歪が発生するが破断に至ることはなく形状は維持される。 ・ 燃料被覆管に塑性歪の発生はない。
1m落下	<p>1) 蓋部あるいは底部を直撃する垂直落下</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 衝撃吸収カバー、蓋部あるいは底部の直撃部が損傷する。 <p>2) 胴部を直撃する水平落下</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 直撃部の胴外板、胴部レジン及び胴ガセットが損傷する。 ・ 直撃部近傍の内筒、アルミスペーサーが変形する。 ・ <input type="text"/> が損傷するが <input type="text"/> は破断には至らない。 ・ <input type="text"/> に局所的な塑性歪が発生するが破断には至らない。 ・ <input type="text"/> に局所的な塑性歪が発生するが破断には至らない。 <p>・ 最大変形時においてもロジメントと収納物の間には隙間が存在しており、<input type="text"/> 燃料集合体が損傷することはない。</p>
熱的試験（耐火）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 容器本体に塑性歪が発生し、内筒の内半径が最大 <input type="text"/> mm 増加するが破断には至らない。
0.9m浸漬	<p>(臨界解析で浸水を想定している)</p>

A. 10. 4 付属書類-4 15m浸漬試験における容器本体の強度

ここでは、輸送容器が水深 15mに相当する外圧を受けた場合に容器本体各部に発生する応力を求め、臨界解析に影響する形状変化等について評価する。

外圧により容器本体各部に発生する応力は、解析コード ABAQUS を用いて求める。

(1) 解析モデル

解析モデルとして、A. 5. 1 と同様に容器本体の  3次元モデルを用いる。当該モデルは、本体（上部フランジ、内筒、胴ガセット、胴外板及び底板）と蓋部（蓋板及び蓋板締付けボルト）で構成されており、蓋板は蓋板締付けボルトを介して上部フランジに接続され、蓋板と上部フランジの接触が考慮されている。

(2) 荷重条件及び境界条件

荷重条件として、容器外面に水深 15mに相当する圧力(0. 15 MPa)を負荷し、蓋板締付けボルトには初期締付けによる軸力を作用させる。

境界条件として、底板中央の軸方向変位、中心軸の半径方向変位、対称面の周方向変位を拘束する。

(3) 解析結果

変形図及び応力分布図をそれぞれ (p) - 第A. 付 4. 1 図及び (p) - 第A. 付 4. 2 図に示す。

(p) - 第A. 付 4. 3 図に示す主要な評価位置について、発生した応力の評価結果を (p) - 第A. 付 4. 1 表に示す。同表に示すように容器本体各部に発生する応力はいずれも降伏応力を下回っており、有意な変形が生じることはない。

B.5.5 最大熱応力

特別の試験条件において、温度分布と線膨張係数の違いにより、容器本体及びバスケットには熱歪が生じる。(□)－A構造解析のA.9に示したように、温度勾配が最大となる火災発生30分後において内筒に発生する熱歪は破断伸びに比べて十分小さく、内筒が破断に至ることはない。この熱歪により内筒に変形が生じる可能性がある。

B.5.6 結果の要約及びその評価

(1) 最高温度

特別の試験条件における輸送物の温度及び温度の変化は、それぞれ(□)－第B.5表と(□)－第B.9図及び(□)－第B.10図に示したとおりである。

ガスケットの最高温度は使用可能温度を下回っており、密封性能が損なわれることはない。レジンは胴外板などに接する表面が炭化する可能性はあるが、であり焼失することはない。その他の構成部品については、損傷に至るような温度にはならない。

したがって、特別の試験条件における輸送物の温度によって、容器の性能が損なわれることはない。

(2) 最大内圧

最大内圧はMPa絶対圧である。構造解析では内外圧力差をMPaとして評価を行っている。

(3) 最大熱応力

温度分布と線膨張係数の違いにより、容器本体には熱歪が発生して内筒に変形が生じる可能性がある。

(ロ)－E 臨界解析

E.1 概要

本解析では、規則に定められた条件において未臨界の状態が保たれることを示す。

臨界計算には、米国オークリッジ国立研究所で開発された SCALE システム¹⁾を用い、実効増倍率(k_{eff})の計算には多群モンテカルロ計算コード KENO-VI を用いた。

本輸送物の臨界解析モデルは、(ロ)－A 構造解析及び(ロ)－B 熱解析において明らかとなった損傷状態を考慮して、胴外板、胴ガセット及び胴部レジン並びに盖板、底板及び衝撃吸収カバーを無視し、軸方向に無限長を仮定した安全側のモデルとした。また、燃料棒の変形は生じないが、安全側に変形を考慮したモデルとした。

なお、通常輸送時、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件に対し、これらを含む損傷状態を考慮した同一のモデルとした。

規則で定められる条件とそれぞれの解析条件の対応を(ロ)－第 E.1 表に示す。同表に示すように、輸送物内への浸水を仮定し、かつ、輸送物が任意の配列で無限個存在する配列系の条件で代表した評価を行い、水密度及び境界条件をパラメータとした解析を実施した。

解析の結果、実効増倍率(k_{eff})は 3σ を含めても十分未臨界である。したがって、本輸送物は規則に定めるいずれの条件においても未臨界である。

(□)－第E.1表 規則で定められる条件と解析条件の対応

規則で定められる条件				解 析 条 件		
条 件	輸送物数	輸送物内への水の浸入	水の近接反射	輸送物の配置	輸送物内への水の浸入	輸送物周囲の境界条件
1. 通常輸送時	要件なし	なし	なし	輸送物が任意の配列で無限個存在すると仮定した。	あり ³⁾	完全反射
2. 孤立系	1個	あり	あり			
3. 一般の試験条件	1個 (孤立系)	あり	あり			
4. 特別の試験条件	1個 (孤立系)	あり	あり			
5. 一般の試験条件	5N個 ¹⁾ (配列系)	要件なし	あり			
6. 特別の試験条件	2N個 ¹⁾ (配列系)	あり ²⁾	あり			

注 1) Nは輸送制限個数を示す。

注 2) (□)－A構造解析のA.9.2に示されるように、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の0.9m浸漬試験において、あらかじめ水の浸入を想定している。

注 3) 本輸送物の場合、通常輸送時及び一般の試験条件の配列系では輸送物内への水の浸入を考慮する必要はないが、安全側に輸送物内への水の浸入ありを解析条件としている。

E.2 解析対象

E.2.1 収納物

本輸送容器にはPWR燃料集合体を最大8体収納する。

本輸送容器に収納する燃料集合体の型式と仕様は(イ)－第A.1表に示した14×14型(10フィートあるいは12フィート)であるが、臨界解析では燃料密度の高い12フィートを対象とする。臨界解析の対象とした燃料集合体の主要諸元を(ロ)－第E.2表に示す。

燃料集合体には、ガドリニウムを含む燃料棒が含まれる場合があるが、安全側に無視し、ペレットの濃縮度は(ロ)－第E.2表に示すように安全側に全て5.0 wt%とする。

また、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件において燃料集合体の変形は生じないが、輸送容器に収納される燃料集合体について全スパンの燃料棒ピッチの変化を安全側に仮定する。この燃料棒ピッチの変化としては、燃料棒がロジメント内に均一に拡がった場合を考える。

E.2.2 輸送容器

本輸送容器は、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件において以下のような変形が生じる。

- ・ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の落下試験において、衝撃吸収カバーが変形する。
- ・ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の落下試験において、内筒、胴外板、胴ガセット、胴部レジン及び衝撃吸収カバーが変形する。また、バスケットの一部が変形・損傷する。
- ・ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の熱的試験において、内筒が変形し半径が拡大する。また、レジンの一部が炭化する。

本輸送物の臨界解析モデルは、以上の損傷を考慮し、通常輸送時、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件を包含する損傷状態を仮定しモデル化する。詳細は付属書類－1に示す。

E.3 モデル仕様

E.3.1 解析モデル

本輸送物の実効増倍率の計算は、(ロ)－第E.1 図～(ロ)－第E.3 図に示す解析モデルで行う。解析モデルは以下の領域により構成される。

- ① 燃料
- ② 燃料被覆管 (ジルコニウム基合金)
- ③ ロジメント (ボロン入りステンレス鋼)
- ④ (アルミニウム合金)
- ⑤ (アルミニウム合金)
- ⑥ アルミスペーサー (アルミニウム合金)
- ⑦ 内筒 (ステンレス鋼)
- ⑧ 水
- ⑨ 空間 (水密度最適化)

解析モデルは、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における損傷状態を考慮し、安全側の評価となるように以下の条件を考慮している。(付属書類－1 参照)

- ・ 軸方向に無限長を仮定し、胴外板、胴ガセット及び胴部レジンを並びに蓋板、底板及び衝撃吸収カバーを無視する。
- ・ 容器内の水密度は、実効増倍率が最大となるように g/cm³ とする。
- ・ 輸送物の外側は、実効増倍率が最大となるように完全反射境界とする。
- ・ 制御棒案内シンプル及び炉内計装用案内シンプルを安全側に無視する。
- ・ 燃料集合体の変形を仮定して考慮し、全燃料集合体についてロジメント内での全スパンの燃料棒ピッチを拡大させた配列とする。

E.4.4 計算結果

臨界計算の結果を(□)－第E.4表に示す。

本計算の結果、実効増倍率に標準偏差の3倍を加えても□であり、未臨界であることが確認された。

(□)－第E.4表 臨界解析結果

keff	σ	keff+3 σ

E.6 結果の要約及びその評価

本輸送容器には、輸送中に燃料集合体が分散あるいは集合しないように、燃料集合体を収納するバスケットが用いられている。燃料集合体を挿入するロジメントには中性子吸収材であるボロンを含むボロン入りステンレス鋼が採用されている。

本輸送容器の臨界解析は、

- ① 通常輸送時
- ② 輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ③ 一般の試験条件下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ④ 特別の試験条件下に置いた輸送物を孤立系の条件に置く場合
- ⑤ 一般の試験条件下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合
- ⑥ 特別の試験条件下に置いた輸送物を配列系の条件に置く場合

の条件を包含するように、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件での最大損傷を考慮し、かつ、輸送物内部への浸水を仮定した配列系の条件で行い、十分未臨界という結果となった。

したがって、上記の①～⑥のいずれの条件においても未臨界は維持される。